

## **МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ППАЗМЫ**

**Фаиз Абузарович ЗАРИПОВ<sup>1</sup>**

**Григорий Иванович ПАВЛОВ<sup>2</sup>**

**Павел Викторович НАКОРЯКОВ<sup>3</sup>**

**Олег Рудольфович СИТНИКОВ<sup>4</sup>**

УДК 534-14

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБАХ, ЗАПОЛНЕННЫХ ГАЗОПУЗЫРЬКОВОЙ ЖИДКОСТЬЮ**

<sup>1</sup> аспирант кафедры специальных технологий в образовании,  
Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева — КАИ (г. Казань)  
zaripovfa@mail.ru

<sup>2</sup> доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой специальных технологий в образовании,  
Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева — КАИ (г. Казань)  
pavlov16@mail.ru

<sup>3</sup> кандидат технических наук, доцент  
кафедры специальных технологий в образовании,  
Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева — КАИ (г. Казань)  
nakorjakov@mail.ru

<sup>4</sup> кандидат технических наук, доцент  
кафедры специальных технологий в образовании,  
Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева — КАИ (г. Казань)  
halmer169990@mail.ru

**Цитирование:** Зарипов Ф. А. Экспериментальное исследование колебательного процесса в цилиндрических трубах, заполненных газопузырьковой жидкостью / Ф. А. Зарипов, Г. И. Павлов, П. В. Накоряков, О. Р. Ситников // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Том 8. № 4 (32). С. 81-94.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-4-81-94

---

### **Аннотация**

На практике волновым процессам в трубопроводах гидравлических систем, как правило, не уделяют внимания. Однако при совпадении частоты пульсаций давления в гидросистеме с частотой ее собственных колебаний могут возникнуть резонансные колебания. Они являются причинами нарушения работы гидравлических систем и разрушений трубопроводов. Для борьбы с таким эффектом иногда применяют механические приспособления (насосы различных типов, аттенюаторы, демпферы, активные устройства и пр.), конструктивно усложняющие гидравлические системы.

Разработка альтернативных способов уменьшения воздействия волновых и вибрационных процессов на трубопроводы является актуальной научно-технической задачей. В работе рассмотрен метод гашения резонансных колебаний в гидросистеме путем подачи в акустический контур трубопровода пузырьков газа. Целью работы являлась разработка способа ослабления пульсаций в жидкости гидравлической системы и оценка его эффективности.

Предложенный способ проверялся практически. Для этого был разработан экспериментальный стенд, имитирующий часть трубопровода гидравлической системы, в который подавались пузырьки газов. Экспериментальным методом определены резонансные частоты и уровни звука в жидкой среде, ограниченной трубой, закрытой с одной стороны, исследовано влияние подаваемого газа с разным объемным расходом на уровень звука в трубе на резонансных частотах основных гармоник и обертонов.

Полученные в ходе исследования результаты позволяют сделать вывод, что подача газа в жидкую среду приводит к изменению свойств этой среды и, как следствие, к снижению уровня звукового давления в жидкости, на резонансных (собственных) частотах колебаний цилиндрических труб, закрытых с одного конца.

### **Ключевые слова**

Незатухающие колебания, пульсации давления, вибрационные процессы в трубопроводах, гашение резонансных колебаний, пузырьковая жидкость, акустическая волна.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-4-81-94

### **Введение**

В гидравлических системах различных механических устройств часто возникают незатухающие колебания, частоты которых совпадают с собственными частотами тракта движения жидкости [1, 5, 8, 9]. Такие колебания появляются

---

тогда, когда в колебательном контуре формируются источник энергии, клапан, регулирующий поступление энергии в колебательную систему, и обратная связь от колебательной системы на клапан. В большинстве случаев пульсации давления в жидкости, движущейся по гидравлическому контуру, являются вредными. Быстропеременное давление в рабочих средах может нарушить работу расходомеров, элементов автоматики и т. д. Так, в работе [11] достаточно подробно изложены результаты исследований причин возникновения колебаний, пульсаций и нарушений линейности статических характеристик гидравлических узлов систем автоматического регулирования паровых и газовых турбин. Пульсации, вызываемые действием дроссельных устройств на рабочую жидкость в проточных линиях гидроусилителей, препятствуют первичному регулированию частоты и мощности в энергосистемах. В работе уделено внимание физике возникновения этих отклонений, указаны способы подавления пульсаций давлений и золотников, спрямления статических характеристик гидроусилителей. Пульсации расхода жидкости в гидромагистрали могут инициировать гидравлический удар, последствия которого хорошо известны в виде, например, механического разрушения труб [10]. Для снижения интенсивности нежелательных колебаний в упругих средах необходимо нарушить баланс между подводимой и теряемой энергией колебательного процесса в системе. Поиск способов и методов уменьшения воздействия волновых и вибрационных процессов на трубопроводы, а также создание устройств, обеспечивающих их реализацию, является актуальной научно-технической задачей. В работе предложен оригинальный метод гашения резонансных колебаний путем подачи в акустический контур пузырьков газа. Взаимодействие пузырьковой жидкости с акустическими волнами рассмотрены во многих работах [6, 7, 12, 14] и до сих пор широко изучаются [2, 3, 13]. Но в предложенном варианте научная задача ставится впервые.

Цель работы — оценить эффективность предлагаемого метода для снижения уровня звука в воде на резонансных частотах основных гармоник и обертонов.

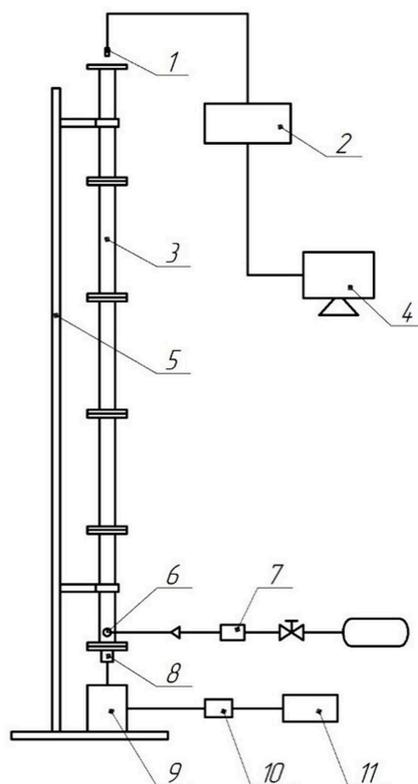
Задачи исследований:

- разработать экспериментальный стенд;
- экспериментальным методом определить резонансные частоты и уровни звука в жидкой среде, ограниченной трубой, закрытой с одной стороны;
- исследовать влияние подаваемого газа с разным объемным расходом на уровень звука в трубе на резонансных частотах основных гармоник и обертонов.

## Материалы и методы

### *Экспериментальный стенд и принцип его работы*

Исследования проводились на экспериментальном стенде (рис. 1), включавшем в себя объект исследования, измерительную систему, устройство генерации колебаний. Объектом исследования являлась металлическая цилиндрическая труба (3) длиной 1,5 м, прикрепленная к стойке (5).



*Рис. 1.* Принципиальная схема экспериментального стенда:  
 1 — акустический датчик;  
 2 — измерительный комплекс «Экофизика»; 3 — труба металлическая;  
 4 — персональный компьютер с программой обработки данных «Сигнал+»; 5 — стойка;  
 6 — пористый керамический распылитель; 7 — расходомер;  
 8 — поршень; 9 — вибростол вибрационной установки;  
 10 — усилитель сигнала;  
 11 — генератор электрических сигналов

*Fig. 1.* Schematic diagram of the experimental stand: 1 — acoustic sensor; 2 — measuring complex “Ecophysics”; 3 — metal pipe;  
 4 — personal computer with data processing program “Signal+”; 5 — rack; 6 — porous ceramic sprayer;  
 7 — flow meter; 8 — piston;  
 9 — vibrating table of vibration installation; 10 — amplifier;  
 11 — generator of electrical signals

Труба заполнялась водой. Открывался кран на баллоне со сжатым газом. Включался измеритель расхода газа (7). Редуктором устанавливался определенный расход газа, который контролировался по скорости газа, измеряемой на входе в распылитель. Подводимый газ смешивался с водой, образуя двухфазную среду: жидкость + газ. Полидисперсность пузырьков формировалась керамическим распылителем (6), имеющим поры разных размеров. Керамический распылитель

располагался в нижней части трубы вблизи поршня. Содержание газа в трубе определялось объемным методом. С генератора (11) переменный электрический сигнал подавался на усилитель (10). В соответствии с заданным сигналом вибростол (9) передавал на поршень (8) механические колебания. Колеблющийся поршень генерировал в жидкости возмущения давления, пропорциональные электрическому сигналу. Усилитель (10) с генератором электрических сигналов (11) позволяли формировать в жидкости звуковые колебания различной частоты и амплитуды. Путем подбора частоты колебания поршня в полости трубы добивались резонансных колебаний. Регистрация параметров колебаний в жидкости осуществлялась акустическим датчиком (1), положение которого в трубе относительно верхнего среза трубы можно было менять. Сигнал с датчика передавался на измерительный комплекс «Экофизика» (2) с подключенным к нему персональным компьютером (4).

### Результаты и обсуждение

Исследования проводились в два этапа. Задачей первого этапа исследований являлось установление зависимости разности уровней звукового давления на резонансных частотах (основной и обертонах) от объемного расхода газа. Необходимость проведения этих исследований обусловлена тем, что в гидравлическом тракте в зависимости от местоположения источника колебания относительно пучностей давления резонансные колебания максимальной амплитуды могут возникать на любой из резонансных частот, не обязательно на основной. Известно большое количество статей по исследованию распространения звуковых колебаний в смеси жидкости и газа (некоторые из них приведены выше). Авторы в своих работах исследовали в основном бегущие звуковые волны в различных средах, в том числе в смеси воды и воздуха. Публикации, связанные с изучением стоячих волн в жидкости при вводе в нее газов, крайне редки [10]. Получение новых данных о стоячих волнах в цилиндрической трубе, заполненной смесью газа и жидкости, является актуальной научной задачей. Задачи, сформулированные авторами данной статьи, решались экспериментальным методом. Исследования проводились как на чистой воде, так и на смеси воды с газом при неподвижном положении поршня и при его колебаниях. В качестве газа использовался азот, подаваемый в жидкость с разным расходом:  $0,2 \cdot 10^{-4}$ ,  $0,4 \cdot 10^{-4}$  и  $0,6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/с. При подаче газа в жидкость на выходе из керамического распылителя образовывались полидисперсные пузырьки. Пузырьки газа распространялись во всем объеме жидкости, образуя двухфазную среду. Содержание газа в жидкости определялось объемным методом. Для трубы длиной 1,5 м и диаметром 0,05 м объемное соотношение воды и азота  $V_r/V_{ж}$  при неподвижном положении поршня для разных скоростей газа в трубке подачи воздуха перед керамическим распылителем составляло: 0,1, 0,28 и 0,42. Следует отметить любопытный факт, что при фиксированном значении расхода газа соотношение азота и воды зависит от частоты резонансных колебаний. Характер этой зависимости отражен в числовых данных, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Соотношение объемного содержания газа и жидкости в трубе в зависимости от частоты колебаний

Объемный расход газа, м <sup>3</sup> /с	Поршень неподвижен	Резонансные частоты		
		242 Гц	761 Гц	1 220 Гц
$0,2 \cdot 10^{-4}$	0,10	0,06	0,13	0,13
$0,4 \cdot 10^{-4}$	0,28	0,12	0,27	0,29
$0,6 \cdot 10^{-4}$	0,42	0,20	0,39	0,40

Table 1

The ratio of the volume content of gas and liquid in the pipe depending on the frequency of vibrations

Объемное соотношение газа и жидкости при неподвижном положении поршня (без колебаний среды) выше, чем в колеблющейся на основной гармонике среде. Причем влияние колебания среды на объемное соотношение наблюдается лишь на основной резонансной частоте. Колебание среды на обертонах на содержание газа в жидкости практически не влияет. Это наблюдается на всех расходах. Из полученных результатов можно сделать вывод, что в исследованном диапазоне изменения расхода газа объемное соотношение газа и жидкости в трубе зависит от основной резонансной частоты колебания среды. Ранее такие данные в литературе не публиковались. Анализ результатов измерений уровня звукового давления в смеси газа и жидкости показал, что его максимальное значение также находится в зоне расположения поршня. Но его значение существенно меньше, чем значение уровня звукового давления в жидкой среде. С удалением местоположения акустического датчика от поршня уровень звукового давления в среде резко падает. Разница в значениях уровней звукового давления зависит как от количества подводимого газа, так и от резонансных частот, что показано в таблице 2.

Таблица 2

Разность уровней звукового давления на резонансных частотах в зависимости от объемного расхода газа

Объемный расход газа, м <sup>3</sup> /с	Разность уровней звукового давления на резонансных частотах, дБ		
	242	761	1 220
$0,22 \cdot 10^{-4}$	14,0	23,0	19,6
$0,44 \cdot 10^{-4}$	19,0	24,0	22,4
$0,70 \cdot 10^{-4}$	24,0	28,0	23,0

Table 2

The difference in sound pressure levels at resonant frequencies depending on the volume flow of gas

Влияние расхода газа на снижение уровня звукового давления на основной гармонике заметнее, чем на обертонах. Чем больше объемный расход газа, тем больше звуковой энергии рассеивается в двухфазной среде. Диссипация акустической энергии в пузырьковых жидкостях отмечалась и другими авторами. Подача газа в жидкую среду способствует изменению свойств среды — упругости и плотности, а следовательно — изменению скорости звука, из-за которого меняется собственная частота трубы, что в нашем случае приводит к рассогласованию частот колебаний поршня и собственной частоты трубы, т. е. к нарушению резонанса. В то же время экспериментально установлено, что при малых объемных соотношениях картина чуть иная: характерная эпюра давления для стоячей волны сохраняется, хотя уровень звукового давления по длине трубы сильно падает. На обертонах резонансные колебания практически полностью глушатся.

Из табличных данных также можно заметить, что акустическая энергия в двухфазной среде наиболее интенсивно рассеивается на резонансной частоте 761 Гц. Это можно объяснить следующим. Керамический распылитель при подаче на него газа генерирует полидисперсные газовые пузырьки. В работе [10] отмечено, что в пузырьковой среде может существовать низкочастотная резонансная дисперсия звука. Максимальный коэффициент затухания энергии в области резонансных частот обусловлен возрастанием вязких потерь при резонансе деформационно-поступательных колебаний пузырьков. Одним из главных параметров, определяющих область резонансной дисперсии, является радиус пузырьков. Авторами данной работы экспериментально установлена зависимость области резонансной дисперсии звука от частот колебания среды при различных средних размерах пузырьков. Например, резонансная дисперсия звука для газожидкостной среды радиусом пузырьков около 1 мм имеет место при частоте волны 60 Гц, что соответствует половине собственной частоты сфероидальных колебаний пузырька. В нашем случае, скорее всего, на выходе из керамического распылителя образуются более мелкие пузырьки, собственные частоты которых кратны резонансной частоте 761 Гц.

Второй этап исследований посвящался установлению экспериментальных зависимостей объемного соотношения газа и жидкости и снижения уровня звукового давления в жидкости после добавления газа от основных резонансных частот колебаний труб разных длин. В экспериментах использовались длины труб: 0,6, 0,9, 1,2 и 1,5 м. Абрис для исследования приведен на рис. 2.

Для вышеприведенных длин труб, заполненных водой (и закрытых с одного конца), рассчитывались основные резонансные частоты: 636, 548, 316 и 253 Гц. В ходе экспериментов возникновение резонанса в трубе с жидкостью контролировалось по значению уровня звукового давления, которое регистрировалось пьезодатчиком, расположенным в пучности давления. При необходимости расчетные значения частот корректировались по уровню звукового давления изменением частоты колебаний поршня с целью добиться максимального его значения. В экспериментах расход газа, подаваемого в жидкость, оставался постоянным

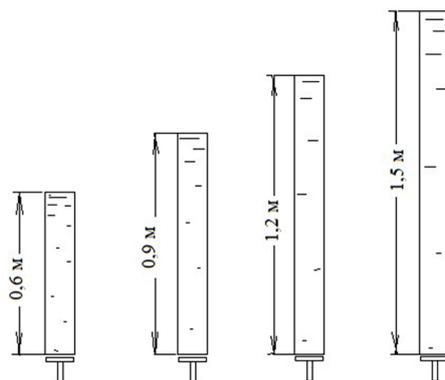


Рис. 2. Абрис труб, использованных при проведении экспериментов

Fig. 2. Outline of the pipes used in the experiments

и равнялся  $V = 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ . После прекращения подачи газа измерялись высота газового столба и уровень жидкости в трубе. Далее по этим значениям определялось объемное соотношение газа и жидкости. В экспериментах уровень газопузырьковой жидкости поддерживался постоянным и соответствовал верхнему срезу трубы. На всех длинах труб экспериментально определялось объемное соотношение газа и жидкости при неподвижном положении поршня и при его колебаниях, при этом частота поршня соответствовала основной резонансной частоте трубы, как и уровень звукового давления в жидкости на основной резонансной частоте после подачи газа в жидкость. По полученным экспериментальным данным построены графики зависимостей объемного соотношения «газ — жидкость» и снижения уровня звукового давления в жидкости после подачи в нее газа от основной частоты резонансных колебаний (рис. 3 и 4). Замечено, что отношение объема газа и жидкости  $V_{\text{г}}/V_{\text{ж}}$  в стоячих волнах, возникающих в четвертьволновых трубах, в сильной степени зависит от частоты (рис. 3). В то же время следует отметить, что в неколеблущейся жидкости количество остающегося в ней газа практически одинаково и не зависит от длины трубы.

Из графика (рис. 3) также видно, что на низких (основных) частотах содержание газовой фазы в жидкости в 2,7 раза меньше, чем при отсутствии колебательных процессов. По мере повышения резонансных частот труб значения объемных соотношений газа и жидкости выравниваются с соответствующими значениями без пульсаций. На исследованных диапазонах частот это значение соответствует 636 Гц или самой короткой длине трубы. Выявленный эффект может иметь большой практический интерес в механике жидкости и газа: используя колебательные процессы в четвертьволновых трубах, можно управлять соотношением газа и жидкости в пузырьковых жидкостях. График зависимости снижения уровня звукового давления в жидкости подачи в нее азота от резонансных частот труб (рис. 4) строился на основе результатов обработки акустических сигналов, записанных пьезодатчиком в зоне расположения поршня (пучности давления стоячих волн для четвертьволновых резонаторов).

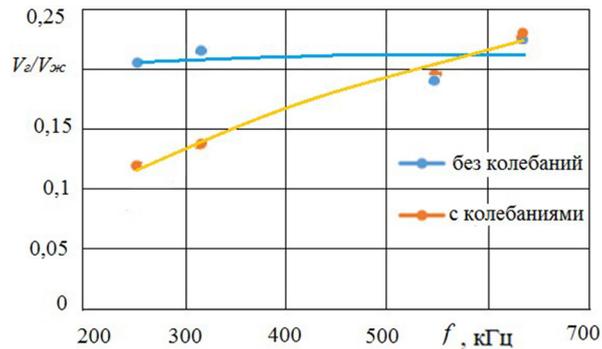


Рис. 3. График зависимости отношения объема газа и жидкости  $V_g/V_l$  от резонансных (собственных) частот колебания цилиндрических труб, закрытых с одного конца

Fig. 3. Graph of the dependence of the ratio of the volume of gas and liquid  $V_g/V_l$  on the resonant (natural) oscillation frequencies of cylindrical pipes closed at one end

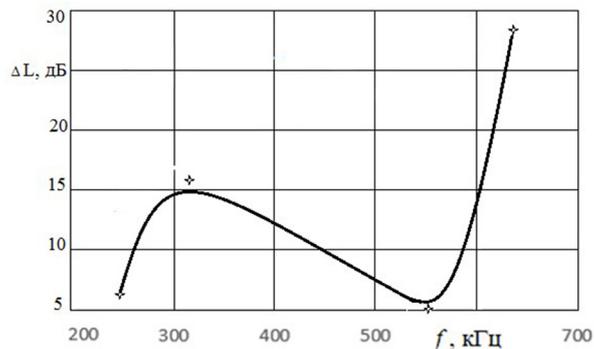


Рис. 4. График зависимости снижения уровня звукового давления в жидкости при подаче азота от резонансных (собственных) частот колебания цилиндрических труб, закрытых с одного конца

Fig. 4. Graph of the dependence of the decrease in the sound pressure level in a liquid when nitrogen is supplied on the resonant (natural) oscillation frequencies of cylindrical pipes closed at one end

Построенный на рис. 4 график свидетельствует о том, что при подаче в колеблющуюся жидкость газовой фазы (при постоянстве объемного расхода) снижение уровня звукового давления имеет немонотонный характер с двумя максимумами. Первый максимум соответствует частоте 316 Гц, второй — частоте 636 Гц. Легко заметить, что эти частоты кратны друг другу. При этом второй максимум по своему значению почти в два раза больше первого. Такую аномалию можно объяснить. Так, например, в работах [4, 10] отмечается, что газовый пузырек в жидкости обладает высокой эффективностью рассеяния энергии. Чем больше содержание газа в жидкости, тем больше эффект рассеяния энергии волны.

Выше было отмечено (рис. 3), что на частоте 636 Гц в жидкости содержится наибольшее количество азота. Результаты хорошо согласуются с данными работы [10]. Кроме того, как уже указывалось ранее, пузырек в воде является препятствием, имеющим и другую плотность, и другую сжимаемость, чем среда. Поэтому он создает дипольное рассеяние волны, вызываемое его поступательными колебаниями как целого относительно жидкости. Наибольшее рассеяние волны достигается в области резонансных частот пузырьков, зависящих главным образом от его радиуса. Есть основание предполагать, что из-за полидисперсности газовых пузырьков на выходе керамического распылителя существуют пузыри, удовлетворяющие этим условиям. Этим же можно объяснить максимум на графике, соответствующий частоте 316 Гц, которая кратна частоте 636 Гц. Содержание азота в воде, колеблющейся с этой частотой, существенно меньше, чем содержание азота в жидкости, колеблющейся с частотой 636 Гц. Следствием этого является существенно меньшее снижение уровня звукового давления.

В вертикально расположенной цилиндрической трубе с открытым концом содержание газа в газопузырьковой жидкости зависит не только от расхода подаваемого газа, но и от частоты резонансных колебаний. Впоследствии в стоячей волне в жидкости это сказывается на значениях уровня звукового давления. График зависимости снижения уровня звукового давления в жидкости при подаче азота от резонансных (собственных) частот колебания цилиндрических труб, открытых с одного конца, может иметь несколько максимумов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева С. А. Инновационные методы диагностики тепловых сетей / С. А. Андреева // Новости теплоснабжения. 2017. № 4 (200). С. 22-38.
2. Губайдуллин Д. А. Акустические волны в вязкоупругих пузырьковых средах / Д. А. Губайдуллин, Р. Н. Гафиятов // Теплофизика высоких температур. 2019. Том 57. № 1. С. 150-153. DOI: 10.1134/S0040364419010290
3. Губайдуллин Д. А. Отражение и прохождение акустической волны через многофракционный пузырьковый слой / Д. А. Губайдуллин, Р. Н. Гафиятов // Теплофизика высоких температур. 2020. Том 58. № 1. С. 97-100. DOI: 10.31857/S0040364420010081
4. Исакович М. А. Общая акустика: учеб. пос. / М. А. Исакович. М.: Наука, 1973. 495 с.
5. Молочников В. М. Переход к турбулентности в канале при отрыве потока за поперечными выступами / В. М. Молочников, О. А. Душина, А. А. Паерелий, С. А. Колчин // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4-3. С. 988-990.
6. Накоряков В. Е. Распространение волн в газо- и парожидкостных средах / В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев, И. Р. Шрейбер. Новосибирск: Ин-т теплофизики, 1983. 237 с.
7. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред: в 2 ч. / Р. И. Нигматулин. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.

8. Роскин А. Б. Устройства для стабилизации колебаний давления и расхода в тепловых сетях / А. Б. Роскин // *Новости теплоснабжения*. 2004. № 2. С. 23-31.
9. Сунчари Р. А. Неустойчивость и автоколебания в гидравлических следящих приводах / Р. А. Сунчари, М. А. Машков, А. В. Матросов // *Динамика и виброакустика*. 2018. Том 4. № 3. С. 16-25. DOI: 10.18287/2409-4579-2018-4-3-16-25
10. Федотовский В. С. Низкочастотная резонансная дисперсия звука в пузырьковых средах / В. С. Федотовский, Т. Н. Верещагина // *Теплофизика и аэромеханика*. 2007. Том 14. № 3. С. 445-448.
11. Чернявский Л. И. Автоматическое регулирование паровых и газовых турбин: повышение надежности и точности систем с проточными гидроусилителями / Л. И. Чернявский. СПб.: Энерготех, 2003. 183 с.
12. Шагапов В. Ш. Особенности преломления и отражения звука на границе пузырьковой жидкости / В. Ш. Шагапов, В. В. Сарапулова // *Акустический журнал*. 2015. Том 61. № 1. С. 40-48. DOI: 10.7868/S032079191406015X
13. Avdeev A. A. *Bubble Systems* / A. A. Avdeev. Switzerland: Springer, 2016. XIX, 466 p. DOI: 10.1007/978-3-319-29288-5
14. Temkin S. *Suspension Acoustics: An Introduction to the Physics of Suspensions* / S. Temkin. N. Y.: Cambridge University Press, 2005. 398 p. DOI: 10.1017/CBO9780511546129

**Faiz A. ZARIPOV<sup>1</sup>**  
**Grigory I. PAVLOV<sup>2</sup>**  
**Pavel V. NAKORYAKOV<sup>3</sup>**  
**Oleg R. SITNIKOV<sup>4</sup>**

UDC 534-14

**EXPERIMENTAL STUDY OF THE OSCILLATORY PROCESS  
IN CYLINDRICAL PIPES  
FILLED WITH GAS-BUBBLE LIQUID**

<sup>1</sup> Postgraduate Student,  
Department of Special Technologies in Education,  
Kazan National Research Technical University  
named after A. N. Tupolev — KAI (Kazan)  
zaripovfa@mail.ru

<sup>2</sup> Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
Head of the Department of Special Technologies in Education,  
Kazan National Research Technical University  
named after A. N. Tupolev — KAI (Kazan)  
pavlov16@mail.ru

<sup>3</sup> Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,  
Department of Special Technologies in Education,  
Kazan National Research Technical University  
named after A. N. Tupolev — KAI (Kazan)  
nakorjakov@mail.ru

<sup>4</sup> Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor,  
Department of Special Technologies in Education,  
Kazan National Research Technical University  
named after A. N. Tupolev — KAI (Kazan)  
halmer169990@mail.ru

---

**Citation:** Zaripov F. A., Pavlov G. I., Nakoryakov P. V., Sitnikov O. R. 2022. “Experimental study of the oscillatory process in cylindrical pipes filled with gas-bubble liquid”. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 8, no. 4 (32), pp. 81-94.

DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-4-81-94

---

**Abstract**

In hydraulic systems, undamped oscillations often occur, the frequencies of which coincide with the natural frequencies of the elements of hydraulic systems. The resulting pressure pulsations in the liquid are harmful and can disrupt the operation of hydraulic systems and elements of its automation.

The search for ways and methods to reduce the impact of wave and vibration processes on pipelines, as well as the creation of devices that ensure their implementation, is an urgent scientific and technical task.

The paper proposes an original method of damping resonant vibrations by feeding gas bubbles into the acoustic circuit. The aim of the work was to evaluate the effectiveness of the proposed method for reducing the sound level in water at the resonant frequencies of the main harmonics and overtones.

To test the proposed method, an experimental stand was developed, the resonant frequencies and sound levels in a liquid medium bounded by a pipe closed on one side were determined by an experimental method, the influence of the supplied gas with different volume flow rates on the sound level in the pipe at the resonant frequencies of the main harmonics and overtones was investigated.

The experimental results obtained allow us to conclude that the gas supply to a liquid medium leads to a change in the properties of the medium and, as a consequence, to a decrease in the sound pressure level in the liquid from the resonant (natural) oscillation frequencies of cylindrical pipes closed at one end.

**Keywords**

Undamped oscillations, pressure pulsations, vibration processes in pipelines, damping of resonant vibrations, bubble liquid, acoustic wave.

**DOI: 10.21684/2411-7978-2022-8-4-81-94**

**REFERENCES**

1. Andreeva S. A. 2017. "Innovative methods of diagnostics of heating networks". Heat Supply News, no. 4 (200), pp. 22-38. [In Russian]
2. Gubaidullin D. A., Gafiyatov R. N. 2019. "Acoustic waves in viscoelastic bubbly media". High Temperature, vol. 57, no. 1, pp. 133-136. DOI: 10.1134/S0018151X1806010X
3. Gubaidullin D. A., Gafiyatov R. N. 2020. "Reflection and transmission of acoustic wave through a multifractional bubble layer". High Temperature, vol. 58, no. 1, pp. 97-100. DOI: 10.1134/S0018151X20010083
4. Isakovich M. A. 1973. General acoustics: Study guide. Moscow: Nauka. 495 p. [In Russian]
5. Molochnikov V. M., Dushina O. A., Paerely A. A., Kolchin S. A. 2011. "Transition to turbulence in a channel with flow separation behind the transversal ribs". Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, no. 4-3, pp. 988-990. [In Russian]

6. Nakoryakov V. E., Pokusaev B. G., Schreiber I. R. 1983. Wave propagation in gas- and vapor-liquid media. Novosibirsk: Institute of Thermal Physics. 237 p. [In Russian]
7. Nigmatulin R. I. 1987. Dynamics of multiphase media: in 2 parts. Part 1. Moscow: Nauka. 464 p. [In Russian]
8. Raskin A. B. 2004. "Devices for stabilizing pressure and flow fluctuations in heating networks". Heat Supply News, no. 2, pp. 23-31. [In Russian]
9. Sunarchin R. A., Mashkov M. A., Matrosov A. V. 2018. "Instability and self-oscillations in electro-hydraulic servo drive". Journal of Dynamics and Vibroacoustics, vol. 4, no. 3, pp. 16-25. DOI: 10.18287/2409-4579-2018-4-3-16-25 [In Russian]
10. Fedotovskiy V. S., Vereshchagina T. N. 2007. "Low-frequency resonance dispersion of sound in the bubble media". Thermophysics and Aeromechanics, vol. 14, no. 3, pp. 425-428. DOI: 10.1134/S0869864307030122
11. Chernyavskiy L. I. 2003. Automatic regulation of steam and gas turbines: improving the reliability and accuracy of systems with flow-through hydraulic amplifiers. Saint-Petersburg: Energotech. 183 p. [In Russian]
12. Shagapov V. Sh., Sarapulova V. V. 2015. "Refraction and reflection of sound at the boundary of a bubbly liquid". Acoustical Physics, vol. 61, no. 1, pp. 37-44. DOI: 10.1134/S1063771014060153
13. Avdeev A. A. 2016. Bubble systems. Switzerland: Springer. XIX, 466 p.
14. Temkin S. 2005. Suspension acoustics: An introduction to the physics of suspensions. New York: Cambridge University Press. 398 p. DOI: 10.1017/CBO9780511546129