

Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук  
«Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН»  
(НЦ НВМТ РАН)

На правах рукописи

ЮШКОВ

Николай Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В  
ПРОТОЧНОМ ВОЛНОВОМ ГЕНЕРАТОРЕ ПЛОСКОГО ТИПА  
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ИЗ  
НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ СРЕД**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Кормилицын В.И.

Москва – 2014

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	11
1.1. Обзор существующих типов смесительных устройств, их достоинства и недостатки.....	11
1.2. Математические модели расчета течения жидкости при высокой степени турбулентности.....	22
1.3. Особенности поперечного обтекания тел различной формы.....	24
1.4. Выводы по главе 1. Постановка задач исследования.....	32
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	34
2.1. Выбор геометрии проточной части волнового генератора.....	34
2.2. Проектирование и монтаж экспериментального гидродинамического стенда.....	39
2.3. Разработка методики визуализации потока жидкости в канале волнового генератора плоского типа.....	43
2.4. Методика определения интенсивности кавитационных процессов и их связь с амплитудно-частотными характеристиками.....	44
2.5. Разработка методики определения влияния кавитации на формирование тонкодисперсных эмульсий.....	46
2.6. Методика измерения статического давления в следе за телами обтекания.....	47
2.7. Расчет энергетических затрат работы волнового генератора.....	48
2.8. Погрешности измеряемых величин.....	49
2.9. Выводы по главе 2.....	50
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПРОТОЧНОМ ВОЛНОВОМ ГЕНЕРАТОРЕ ПЛОСКОГО ТИПА.....	51
3.1. Экспериментальное исследование течения жидкости в проточном генераторе с визуализацией потока при обтекании тел различной формы.....	51
3.2. Гидродинамические особенности течения жидкости в узком профилированном канале с различными телами обтекания.....	58

3.3. Исследование влияния гидродинамических параметров течения жидкости на интенсивность кавитационной эрозии .....	59
3.4. Анализ нестационарных волновых явлений в следе за телами обтекания различной формы .....	64
3.5. Исследование полей статического давления за телами обтекания различной формы .....	70
3.6. Исследование влияния внешней турбулентности потока на формирование кавитационных явлений .....	78
3.10. Выводы по главе 3 .....	81
ГЛАВА 4. Формирование тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся жидкостей .....	83
4.1. Исследование влияния кавитации на образование однородных эмульсий в проточном волновом генераторе плоского типа .....	83
4.2. Оценка энергозатрат работы проточного волнового генератора плоского типа для формирования тонкодисперсных эмульсий .....	90
4.3. Выводы по главе 4 .....	92
ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЕ ПЛОСКОГО ВОЛНОВОГО ГЕНЕРАТОРА В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ .....	93
5.1. Очистка нерафинированного масла .....	93
5.2. Технология обессоливания нефти .....	97
5.3. Подготовка и сжигание местного топлива (сырой нефти) в виде водотопливной эмульсии в котле ДКВР 10/13 .....	101
5.4. Выводы по главе 5 .....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	108
ЛИТЕРАТУРА .....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 .....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 .....	142

## ВВЕДЕНИЕ

Приготовление тонкодисперсных, высокоомогенных и стабильных эмульсий является актуальной проблемой, остро стоящей на сегодняшний день во множестве отраслей промышленности (нефтяного комплекса, теплоэнергетики, химической, машиностроения, агропромышленного комплекса, строительства, пищевой и т.д.). Особое значение данная проблема имеет и для экологии. На настоящий момент существующие методы получения эмульсий не обеспечивают необходимого качества получаемой эмульсии для различных технологических процессов и отличаются высоким энергопотреблением при относительно низкой производительности.

Например, в нефтяной промышленности при обессоливании нефти необходимо создать водонефтяную эмульсию определенной дисперсности для дальнейшего разделения в электрообессоливающих установках (ЭЛОУ).

В энергетике на большинстве электрических станций, а также промышленных и отопительных котельных используется мазут в виде основного или резервного топлива. При транспортировке, разгрузке и хранении мазут насыщается водой, которая со временем собирается в водяные мешки или линзы со спонтанным распределением их по объему емкостей.

Решением таких проблем, в данном случае, является создание технологии формирования высокоомогенных и стабильных эмульсий необходимого качества из несмешивающихся жидкостей.

В настоящее время перспективными устройствами для получения такого рода эмульсий признаны генераторы, реализующие кавитационные волновые явления. Важную роль в волновой технологии, базирующейся на возбуждении нелинейных колебаний в многофазных средах, играют гидродинамические генераторы проточного типа. В таких генераторах колебания возбуждаются в рабочем участке проходящим потоком, то есть обрабатываемая среда служит одновременно и рабочей средой. Среди гидродинамических генераторов проточного типа особое место занимают волновые генераторы, принцип действия которых основан на эффектах и явлениях нелинейной волновой механики,

разработанных в НЦ НВМТ РАН под руководством академика РАН Р.Ф. Ганиева. Конструктивные решения проточных волновых генераторов базируются на экспериментальных данных исследований гидродинамических течений с формированием различных кавитационных областей и определением качественных и количественных характеристик обрабатываемых жидкостей, что существенно улучшает эффективность технологических процессов, как в технико-экономическом, так и в экологическом аспектах.

Поэтому, тема настоящей работы связана с исследованием, выявлением рабочего диапазона динамических процессов и оптимизацией конструктивных решений проточной части волнового генератора с целью формирования тонкодисперсных эмульсий из несмешиваемых жидкостей (ЭНЖ).

#### **Цель и задачи исследования**

Получение тонкодисперсных, высокоомогенных эмульсий из несмешивающихся сред в проточных генераторах плоского типа, реализующих эффекты и явления нелинейной волновой механики.

Анализ состояния вопроса получения тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся сред, а также экспериментальных и теоретических данных для формирования тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся сред. Разработка и модернизация гидродинамического стенда, отработка методик проведения экспериментальных исследований для получения тонкодисперсных, высокоомогенных эмульсий. Проведение параметрических экспериментальных исследований динамических процессов работы проточных волновых генераторов с поверхностными вихрегенераторами и телами обтекания различной формы с нахождением оптимальных геометрических и гидродинамических характеристик. Исследование кавитационных явлений с конкретизацией исходных граничных условий для расчета течений различных исходных компонент в генераторах приготовления эмульсий из несмешивающихся сред. Экспериментальное исследование ряда промышленных рабочих сред (нефть, мазут, масла различной вязкости) для формирования в широком параметрическом диапазоне

тонкодисперсных, высокогомогенных водяных эмульсий. Разработка рекомендаций по внедрению генераторов в различных областях промышленности.

В первой главе автором сделан литературный обзор существующих типов смесительных устройств, выделение проточного волнового генератора плоского типа, как наиболее перспективного. Анализ материалов по вопросам возникновения и развития кавитации в многофазных системах при наличии влияния на эти процессы волновых полей, уровни турбулентности и завихренности потока, а также геометрия тел обтекания, определяющая характер отрыва потока с поверхности этих тел показал, что в литературных источниках расчетных и экспериментальных данных для создания эффективных проточных волновых генераторов с целью формирования тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся сред оказалось недостаточно.

Во второй главе изложены методики проведения экспериментальных исследований проточного волнового генератора плоского типа с различными геометриями тел обтекания. Разработаны и применены методики визуализации потока, оценки интенсивности и степени влияния на формирование тонкодисперсных эмульсий из несмешиваемых жидкостей кавитационных процессов при обтекании жидкостью различных тел в тонком плоском канале.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию течения жидкости и возникающих динамических процессов и кавитационных явлений при обтекании тел различной геометрии в плоском профилированном канале в зависимости от гидродинамических и теплофизических параметров работы волнового генератора.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований по формированию тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся сред в проточном волновом генераторе плоского типа на гидродинамическом стенде СТ-3.

В пятой главе изложены результаты лабораторных и промышленных испытаний проточного волнового генератора плоского типа на формирование

стабильных эмульсий применительно к жидкостям из нефтяной, энергетической и пищевой промышленности.

### **Научная новизна**

1. Для различных геометрий тел обтекания и гидродинамических режимов работы проточного волнового генератора в диапазоне чисел Рейнольдса ( $5 \cdot 10^4 \div 2,2 \cdot 10^5$ ) установлены экспериментальные зависимости:

1.1. Размеров кавитационных зон.

1.2. Амплитудно-частотных характеристик колебаний давления.

1.3. Интенсивности кавитационного износа материала.

1.4. Значений статических давлений в донной области за телами обтекания.

2. Экспериментально обосновано применение проточного волнового генератора для формирования тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся сред.

3. Научно обоснованы конструктивные решения (геометрические характеристики побудителей кавитации, поверхностные вихрегенераторы) и диапазоны гидродинамических режимов работы проточного волнового генератора для высокоэффективного получения смесей и эмульсий.

### **Практическая ценность**

Полученные экспериментальные результаты обтекания тел различной формы двухфазной жидкостью в тонком плоском канале позволяют использовать их при оптимизации существующих и разработке новых проточных волновых генераторов, реализующих эффекты и явления нелинейной волновой механики и технологии, для создания тонкодисперсных, высокоомогенных и стабильных эмульсий в различных областях промышленности и повышения технико-экономических и экологических показателей технологических процессов.

В частности результаты работы были использованы на паровом котле паросилового хозяйства п. Игра (Удмуртия), где был установлен плоский волновой генератор. Его применение для подготовки к сжиганию сырой местной нефти с наличием линз воды в виде водотопливной эмульсии позволило

обеспечить ее эффективное сжигание и безопасную эксплуатацию энергетического оборудования.

Применение проточного волнового генератора плоского типа было апробировано с получением положительных результатов для пищевой промышленности при очистке нерафинированных растительных масел от различных примесей.

Использование волнового генератора позволило также улучшить показатели метода электро-обессоливания и обезвоживания сырой нефти.

### **Личный вклад автора**

Модернизация экспериментальной установки, разработка методик и программ исследований, экспериментальные исследования, разработка и апробация новых конструктивных решений проточной части генератора, обработка и анализ опытных данных, составление рекомендаций и заключений по результатам работы.

### **Апробация работы и публикации**

Материалы диссертационной работы и основные результаты докладывались и обсуждались на:

- всероссийской научной школе молодых ученых «Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил» (Москва, 2010 г.);
- четвертой международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Москва, 2011 г.);
- XXXII всероссийской конференции «Проблемы науки и технологий», (Миасс, 2012 г.);
- международной научной конференции «Колебания и волны в механических системах» (Москва, 2012 г.);
- международной научной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения» (Москва, 2013).

По результатам выполненных исследований опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 статьи в научных журналах, входящих в перечень ВАК. Материалы диссертации также изложены в научно-техническом отчете НЦ НВМТ



РАН «Исследование кавитационных явлений в многофазных системах в волновых полях» и являются основой научного проекта РФФИ 12-08-13106-офи\_м\_РЖД рег. №0120127664.

**На защиту выносятся следующие результаты диссертационной работы:**

1. Разработка и модернизация гидродинамического лабораторного стенда, основные положения методик проведения экспериментальных работ по выявлению механизмов кавитационных процессов, которые приводят к дополнительному увеличению интенсивности диспергации.

2. Результаты параметрических экспериментальных исследований нелинейных динамических процессов работы проточных волновых генераторов с поверхностными вихрегенераторами и телами обтекания различной геометрии, нахождение оптимальных геометрических и гидродинамических характеристик.

3. Анализ результатов экспериментальных исследований кавитационных явлений в проточном волновом генераторе плоского типа.

4. Результаты экспериментальных исследований ряда промышленных рабочих сред (нефть, мазут, масла различной вязкости) для формирования в широком параметрическом диапазоне тонкодисперсных, высокоомогенных водяных эмульсий.

5. Разработка рекомендаций повышения эффективности эмульгирования рабочих сред в различных областях промышленности.

Автор выражает глубокую благодарность за научные консультации и помощь в подготовке диссертации научному руководителю, главному научному сотруднику лаборатории «Нелинейной волновой технологии» НЦ НВМТ РАН, доктору технических наук, профессору Владимиру Ильичу Кормилицыну и старшему научному сотруднику лаборатории «Нелинейной волновой технологии» НЦ НВМТ РАН, кандидату технических наук Олегу Владимировичу Шмыркову за содействие при проведении экспериментальных исследований и обработке данных. Отдельную благодарность автор выражает директору НЦ НВМТ РАН академику, доктору технических наук, профессору Ривнеру Фазыловичу Ганиеву.

## ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Смесительные устройства используются для смешения различных легко- и трудно-смешиваемых компонентов и получения однородных, высокодисперсных эмульсий. Размер частиц компонент смешиваемых сред определяет ее дисперсность, что говорит о качестве полученной эмульсии. Чем выше дисперсность, тем устойчивее и стабильнее эмульсии и выше ее качество.

В настоящее время смесительные устройства различного типа интенсивно применяются в большинстве отраслей промышленности: нефтехимической, пищевой, теплоэнергетике, строительстве, агрокомплекса и др. для перемешивания, диспергации и массообмена. Смесительные устройства применяют при добыче и переработке нефти, для создания новых материалов в строительстве, для смешения и активации многокомпонентных смесей, для улучшения реакционности и получения новых видов топлива с использованием возобновляемых источников [1-6].

Большинство смесительных устройств по принципу работы можно разделить на:

- механические (мешалки, золотники, слияние 2-х трубопроводов, коллоидные мельницы, пневматические);
- кавитационные с подвижными элементами (пьезоэлектрические, роторные, струйные, вибрационные);
- кавитационные статические (плоские, объемные, вихревые).

### 1.1. Обзор существующих типов смесительных устройств, их достоинства и недостатки

#### **Механические смесители**

Весьма распространенной на сегодняшний день в различных отраслях промышленности является традиционная технология смешения различных компонентов в жидкостных потоках, основанная на механической обработке перемешиваемой среды. Объясняется это достаточным количеством работ,

описывающих математические модели расчета физических процессов, гидродинамики и тепломассообмена с учетом характеристик рабочей жидкости.

Основным рабочим органом в таких устройствах выступает мешалка с различного вида лопастями, выполненными по быстроходному или тихоходному исполнению. Процесс перемешивания осуществляется обычно в сосуде или резервуаре, что значительно увеличивает время обработки смеси. В работах [7] показано, что качество перемешивания зависит не только от типа и конструкции мешалки, но и от вида рабочей емкости. На рисунке 1.1 показаны схемы движения обрабатываемой жидкости при использовании различных типов механических устройств.

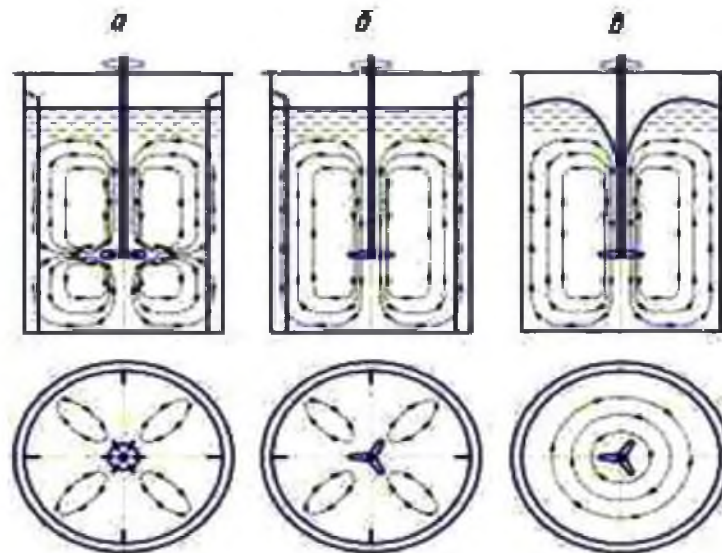


Рис.1.1. Схема работы мешалок

а – турбинная, емкость с перегородками; б – пропеллерная, емкость с перегородками; в – пропеллерная, емкость без перегородок [8]

Также распространен способ перемешивания слабвязких сред путем слияния двух трубопроводов в один, большего диаметра. В большинстве случаев для улучшения качества смешивания поток пропускают через насос или другое смешивающее устройство.

Широкое применение в пищевой, химической, фармацевтической и др. промышленности нашли смесительные устройства типа коллоидных мельниц. Известно много конструкций коллоидных мельниц, представленных в работах [9,10]. Основными элементами мельницы являются вращающийся ротор и

неподвижный статор, между которыми создается очень малый зазор в 0.2-0.6 мм (рисунок 1.2). Получение эмульсии происходит за счет «перетирания» компонент рабочей жидкости в тонком зазоре. Уменьшение размера капель, получаемых эмульсий в таких устройствах, достигается уменьшением зазора между ротором и статором либо увеличением скорости вращения ротора.

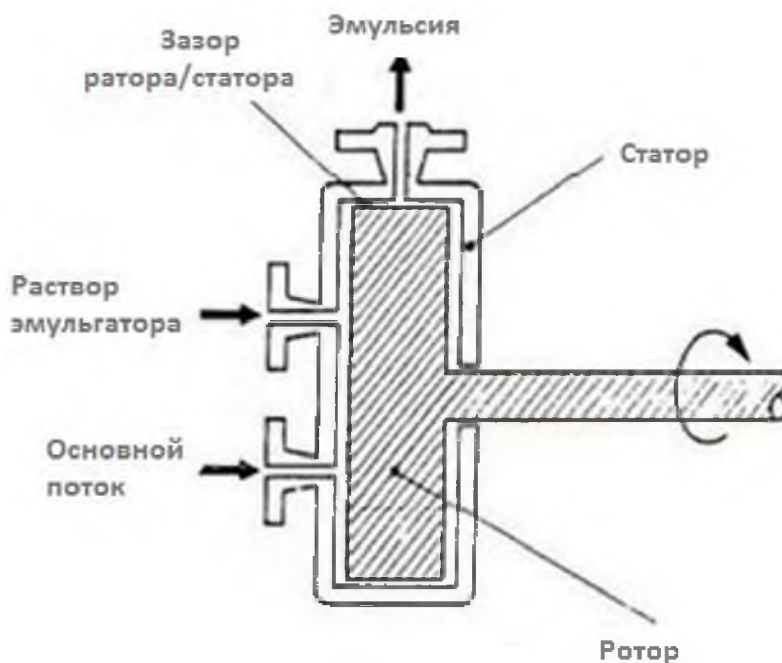


Рис.1.2. Схема коллоидной мельницы

Основным недостатком коллоидных мельниц является быстрый износ рабочих поверхностей ротора и статора, соответственно, увеличение зазора между ними и ухудшения качества получаемых эмульсий, а также необходимость использования сальниковых уплотнителей для герметизации вала ротора.

К механическому способу также относят приготовление эмульсий с помощью воздуха или пара [11]. Такой способ дает возможность получить на выходе дисперсность в размере 15-30 мкм, при этом при барботаже воздухом повышается вероятность взрыва для некоторых видов жидкостей.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что традиционные технологии малоэффективны, обладают малой мощностью, недостаточно надежны, ввиду наличия подвижных частей, обладают застойными зонами и недостаточно качественно перемешивают, но при этом обладают относительной дешевизной и хорошо изучены.

## **Применение кавитационных технологий**

Основным направлением повышения эффективности работы смесительных устройств и улучшения качества получаемой эмульсии в настоящее время является волновая, кавитационная обработка смешиваемой среды. Традиционно полагается, что явление кавитации носит разрушительный характер на поверхности, вблизи которых она протекает. Кавитация сопровождается шумом, вибрацией, нестабильной работой оборудования, преждевременной поломкой рабочих органов и т.д. [12-20].

Известно [21], что кавитация представляет собой средство локальной концентрации энергии низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. В фазе разрежения акустической волны или за счет местного понижения давления при обтекании твердого тела, в жидкости образуются каверны (кавитационные пузырьки), которые заполняются насыщенным паром данной жидкости. В фазе сжатия под действием повышенного давления и сил поверхностного натяжения каверна захлопывается, а пар конденсируется на границе раздела фаз. Через стены каверны в нее диффундирует растворенный в жидкости газ, который затем подвергается сильному адиабатическому сжатию.

В момент схлопывания кавитационной каверны давление и температура газа локально могут достичь значительных величин (по расчетным данным до 100 МПа и до 10000 К соответственно) [16]. После схлопывания кавитационного пузырька в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве. При генерировании импульсных растягивающих напряжений в жидкости, присутствующие в ней зародыши кавитации (устойчивые паровые и газовые пузырьки малых размеров) начинают расти, образуя кавитационный кластер, форма и размеры которого определяются начальным спектром размеров кавитационных зародышей, характером прикладываемого напряжения и граничными условиями.

В кавитационную каверну могут проникать пары жидкости, растворенные газы, а также вещества с высокой упругостью пара и не могут проникать ионы

или молекулы нелетучих растворенных веществ. Выделяющейся в процессе схлопывания каверны энергии достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высокой упругостью пара внутри кавитационной каверны [21].

Наряду с отрицательными явлениями известны и широко применяются полезные эффекты, характеризующиеся проявлением кавитации в специально созданных устройствах [22-33]. Очистка поверхностей, эмульгирование, гомогенизация, диспергация, пенообразование и газификация осуществляются в результате схлопывания кавитационных пузырьков за счет образования кумулятивных струек и волновых явлений.

### **Кавитационные смесители с подвижными элементами**

Стремление повысить производительность смесительных устройств, а также улучшить качество получаемых эмульсий, привело к созданию различных конструкций диспергаторов, использующие вынужденные колебания различных поверхностей для создания волн звукового или ультразвукового диапазона в упругой среде.

Широкое применение нашли ультразвуковые смесительные аппараты с электрическим излучателем, которые вызывают звуковые волны в обрабатываемой упругой среде путем возвратно-поступательного движения излучателя, представляющего из себя пластину, под действием переменного электрического и магнитного полей [34,35]. Диапазон частот возбуждаемых колебаний достаточно широк, от 5 до 40 кГц и выше.

На рисунке 1.3 показан ультразвуковой узел смесителя. От ультразвукового генератора напряжение ультразвуковой частоты поступает на ультразвуковой преобразователь (1), который преобразует высокочастотное напряжение в механические колебания ультразвуковой частоты. Эти колебания передаются в излучатель, который содержит концентратор (2), посредством которого высокочастотные колебания усиливаются и на выходе излучателя (3) они могут

составлять до 100 микрон и более. Преобразователь с излучателем крепится к корпусу реактора (на рисунке не показан) посредством опоры (4). [36].

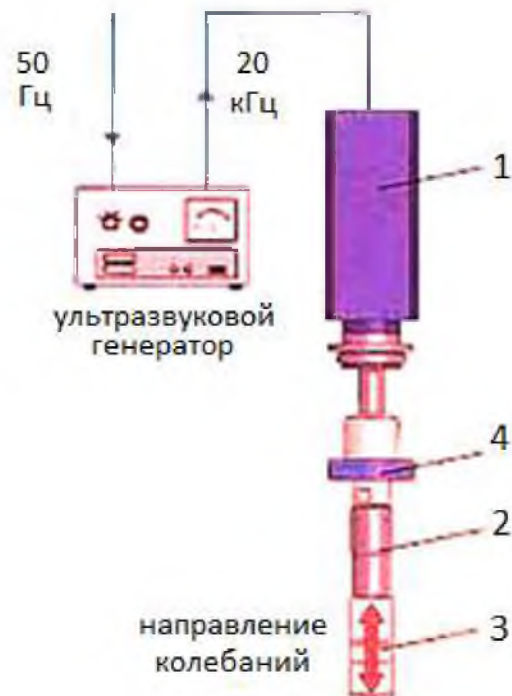


Рис. 1.3 Пьезоэлектрический ультразвуковой генератор

Основным недостатком пьезоэлектрических генераторов является быстрый износ поверхности излучателя из-за схлопывания образовавшихся кавитационных пузырьков вблизи его поверхности, а также применение дополнительной электрической мощности.

В генераторах пластинчатого, мембранного, стержневого типа поток жидкости вытекает с большой скоростью из щелевидного сопла, попадает на специально профилированный отражатель и, веерообразно отражаясь, ударяется на закрепленные стержни или пластины. Под действием струи подвижные элементы изгибаются и приходят в колебательное движение. При этом в среде возникают акустические колебания широкого спектра. Широко используются в последнее время генераторы со сложной формой резонаторов. Пример такого смесителя представлен на рисунке 1.4. Он состоит из корпуса 1, к которому прикреплен патрубок 8 с соплом 2, осуществляющим плавный переход жидкости в небольшое отверстие. На сопло 2 устанавливается держатель 7, на внешней стороне которого находится первый многостержневой резонатор 6, а на внутренней - сферический отражатель 3. На резонаторе 6 винтами 4 крепят второй



многоствержневой резонатор 5. Резонаторы расположены так, что в радиальном направлении стержни одного из них соответствуют прорезам другого. Компоненты эмульсии (дисперсии) подаются через патрубок 8 под давлением 1-1,2 МПа в сопло 2. Вытекая из сопла, они ударяются в отражатель 3, а затем - в резонаторы. Вибрируя с высокой частотой, резонаторы возбуждают в смеси мощные ультразвуковые колебания широкого спектра, эмульгирующие поток несмешивающихся жидкостей [5].

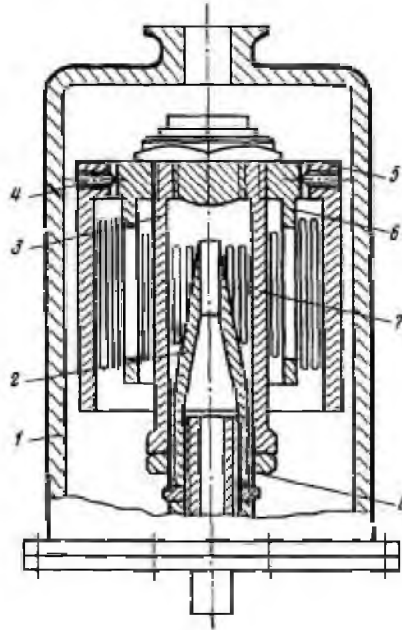


Рис.1.4. Генератор пластинчатого типа

Гидродинамический генератор роторного типа представляет собой жидкостную (гидродинамическую) сирену [37-38]. Акустические колебания звуковых частот создаются за счет периодического перекрытия пазов в статоре зубцами вращающегося ротора. Схема такого устройства называемого роторно-пульсационный аппарат (РПА) представлена на рисунке 1.5 [5].

Основными частями РПА являются ротор и статор, которые помещены в корпусе. Принцип работы РПА относительно прост и заключается в следующем. Компоненты обрабатываемой среды подаются в аппарат через входной патрубок и первоначально поступают в полость вращающегося ротора. При вращении каналы ротора периодически совпадают с каналами статора. При этом в рабочей камере статора попеременно создается пониженное давление при несовпадении каналов и рабочее повышенное давление при прохождении рабочей жидкости в

камеру. Пониженное давление вызывает растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает образование кавитационных пузырьков и их дальнейшее схлопывание в фазу повышенного давления [5].

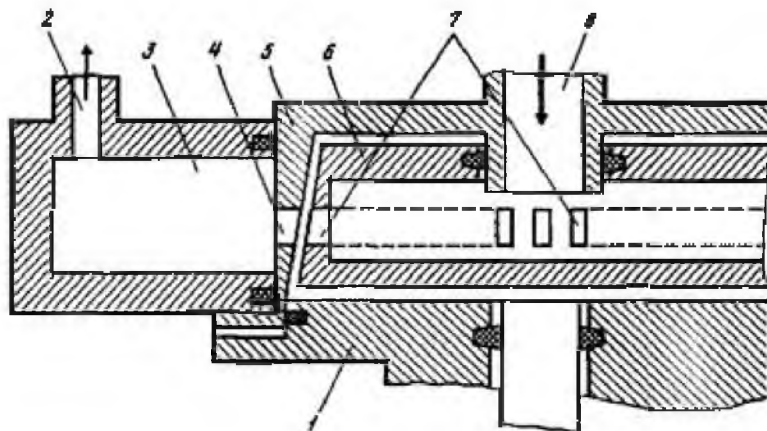


Рис. 1.5. Роторно-пульсационный аппарат (РПА)

- 1 - корпус, 2 - патрубок выхода, 3 - рабочая камера, 4 - отверстия (каналы) статора, 5 - статор, 6 - ротор, 7 - отверстия (каналы) ротора, 8 - патрубок для ввода компонентов обрабатываемой среды

Генераторы роторного типа успешно применяются для приготовления жидких эмульсий, однако они мало пригодны для приготовления суспензий и для обработки дилатантных жидкостей из-за опасности заклинивания в узком зазоре между ротором и статором. Также наличие подвижных частей снижает надежность работы смесителей вышеуказанных типов.

### **Кавитационные статические смесители**

Все смесительные устройства в качестве механизма смешения используют эффект повышения турбулентности, которое характеризуется числом  $Re$ . В [39] показано, что диспергирование и дробление эмульсии происходит в области повышенной турбулентности, а в других областях – только перенос частиц.

По сравнению со смесительными аппаратами других типов стоит выделить проточные устройства, использующие энергию потока жидкости для смешения и гомогенизации рабочей среды. В результате обтекания жидкостью тел сложной формы возникают кавитационные и волновые явления, которые интенсифицируют процесс диспергирования.

Генераторы, в основном, различаются между собой формой каналов, числом рядов и количеством в ряде тел обтекания, формой плохообтекаемых тел и способом регулирования производительности смесителя.

Среди статических гидродинамических смесительных устройств выделяют генераторы плоского, объемного и вихревого типов [40-44].

Плоский проточный генератор 1 (рисунок 1.6) представляет из себя прямоугольный ровный или профилированный канал с входным патрубком 3, проточной камерой 2, и выходным патрубком 4. Смесь жидкостей, обтекая тело кавитации 5а, разгоняется до 20-30 м/с, при этом за телом образуются отрывные зоны и зоны пониженного давления, в которых образуются пузырьки, заполненные паро-газовой смесью, т.е. гидродинамическая кавитация. Уносимые основным потоком эти пузырьки в дальнейшем попадают в область повышенного давления, где схлопываются со скоростью, близкой к скорости звука, что приводит к резким колебаниям давления, образованию зон волнового воздействия на поток, повышению турбулентности, в результате чего происходит диспергирование составляющих смеси и ее гомогенизация. Тела обтекания устанавливаются таким образом, что бы зоны активного схлопывания пузырьков располагались по всему сечению проточной части генератора. В устройстве предусмотрены: камера для ввода добавочных компонентов 6, регулятор объемного расхода смеси 7, раздающий коллектор 8, раздающие сопла 11, 12 для ввода дополнительного компонента. Данный тип генератора выбран как прототип для исследуемого проточного волнового генератора.

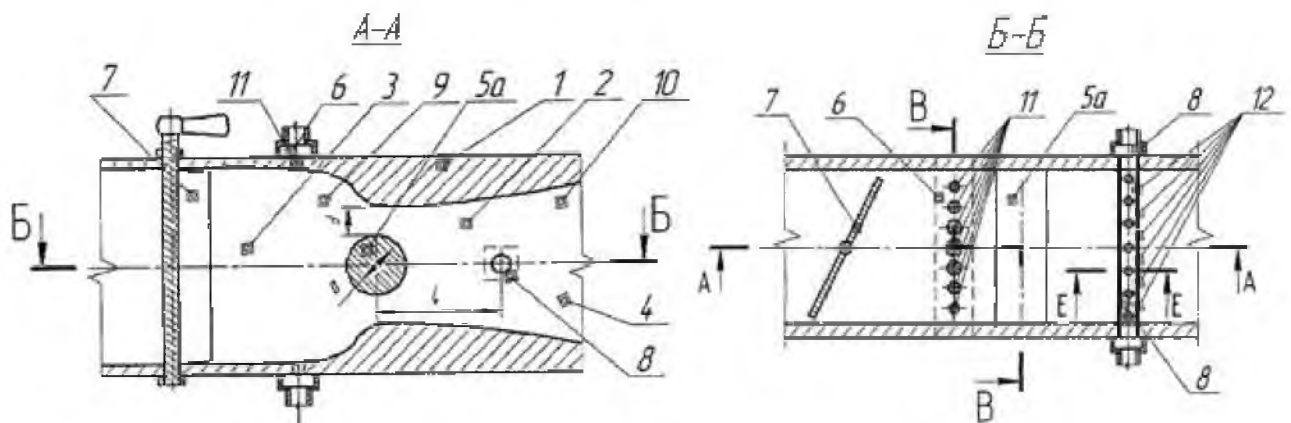


Рис. 1.6. Устройство для гомогенизации смеси плоского типа

Генераторы объемного типа имеют схожий принцип движения жидкости и работы. Они отличаются тем, что профиль рабочего канала имеет круглую форму, а тела обтекания крепятся на специальных удерживающих устройствах и располагаются в потоке жидкости. На рисунке 1.7 представлен гидродинамический кавитационный активатор (ГКА) фирмы «ИНТРЭК». Недостатком этого устройства являются протяженные габариты 1500-1800м, требующие длинные участки трубопровода, и отсутствие возможности регулировки качества получаемой эмульсии [45].

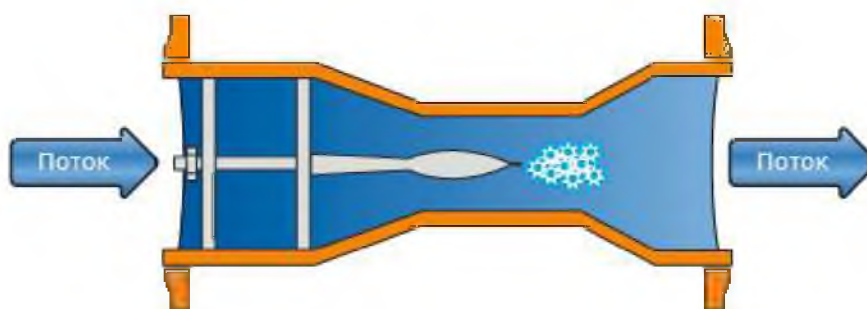


Рис. 1.7. Гидродинамический кавитационный активатор

Преимущества плоского генератора перед объемным заключаются в возможности получения более стабильного двухмерного потока, а также сохранения автомодельности течения в проточной части генератора путем создания многоканальной компоновки устройства и регулирования перекрытия нескольких каналов при изменении расхода несущей жидкости в рабочем трубопроводе. Процесс кавитационной обработки в плоских генераторах, как частный случай трубы Вентури, создается внутри объема жидкости. При этом возможно создать такой профиль тел обтекания, при котором уменьшается кавитационный износ внутренней поверхности канала смесительного устройства без ухудшения эффективности работы смесителя [46]. Еще одним недостатком объемного генератора является конструкция удерживающих устройств тел обтекания. Подверженные износу, они после длительной эксплуатации могут разрушиться, что приведет к уносу тела обтекания из генератора и поломке оборудования. Генератор плоского типа лишен этого недостатка, т.к. в нем тела обтекания жестко закреплены в съемных крышках. Так же с точки зрения

технологичности и материалоемкости производство генератора плоского типа более рентабельное.

Генераторы данных типов обеспечивают высокое качество формируемой эмульсии, достаточную производительность при небольших размерах устройств, невысокие удельные энергозатраты, ввиду низкого перепада давления на генераторе. Отсутствие подвижных частей положительно сказывается на надежности и герметичности работы таких устройств.

Генераторы вихревого типа также эффективны для получения тонкодисперсных эмульсий (рисунок 1.8). Там, возникают мощные кавитационные явления и пульсации давления за счет тангенциального выхода рабочей жидкости из тонкого (2-3 мм) отверстия, его разворота, завихрения и выхода в рабочую камеру с повышенным давлением, где происходит схлопывание кавитационных пузырьков.

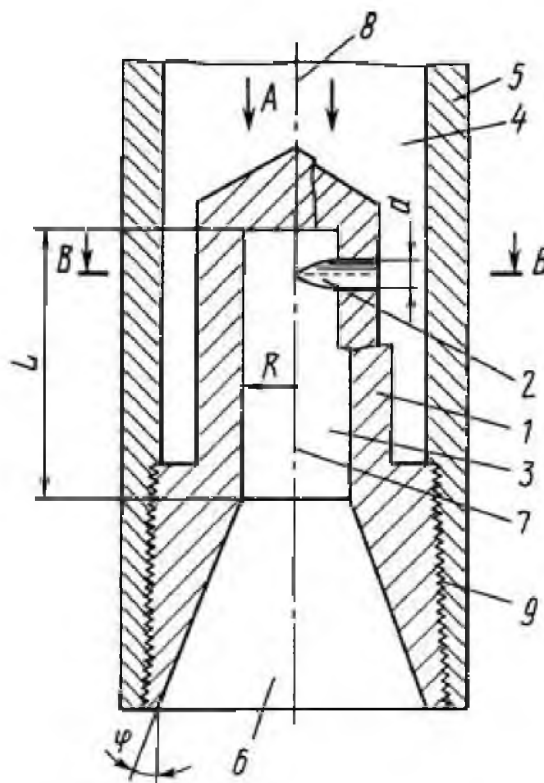


Рис. 1.8. Проточный генератор вихревого типа

Относительно небольшое проходное сечение генератора накладывает ограничения на расход рабочей жидкости и размер твердой фазы в ней, а высокие рабочие давления (до 10 МПа) – на подающее оборудование и энергозатраты.

## 1.2. Математические модели расчета течения жидкости при высокой степени турбулентности

Технологический процесс смешения нерастворимых друг в друге вязких сред, базируется на организации перемешивания составных компонент в турбулентных потоках. Турбулентные потоки, формируемые в специальных аппаратах, имеют поля скоростей, давления, температуры и других гидродинамических величин весьма сложной нестационарной структуры, причем характерные времена (масштабы) этих нестационарностей могут иметь весьма широкий диапазон. Знание же их является необходимым как на стадии проектирования оборудования, так и при его эксплуатации с целью получения высококачественных тонкодисперсных высокостабильных эмульсий [1].

Для математического моделирования и расчета гидродинамических и кавитационных характеристик турбулентного потока жидкости в настоящее время наиболее распространенной является методика расчета с использованием усредненных уравнений Навье-Стокса (RANS – Reynolds-averaged Navier-Stokes) с декомпозицией решения точных уравнений Навье-Стокса [47] на усредненные по ансамблю и флуктуирующие компоненты, в которых присутствует добавочный член, описывающий эффекты турбулентности [48-53].

При обтекании тел высокотурбулентным потоком жидкости, неизбежно происходят отрывы потока, разрывы среды в областях пониженного давления с образованием кавитационных пузырьков и дальнейшим их схлопыванием. Этот факт приводит к образованию многофазного потока. В модели кавитации сделано предположение, что система включает только две фазы (жидкость и пар), между которыми происходит перенос массы [54]. Основной поток предполагается смесью жидкости, пара и неконденсируемых газов. Уравнения движения учитывают поток и эффекты турбулентности.

Недостаток подхода, основанного на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, заключается в том, что здесь используется осреднение по всему диапазону турбулентных масштабов.

В развитой турбулентности выделяют два принципиально различных масштаба движений: крупномасштабную турбулентность, которая определяется геометрией и структурой среднего течения и не описывается универсальным образом, и мелкомасштабную турбулентность, которая является равновесной и имеет универсальную структуру. В методе моделирования крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation) крупномасштабные вихревые структуры рассчитываются при помощи интегрирования фильтрованных уравнений Навье-Стокса. Мелкие вихри, размер которых не превышает шага разностной сетки, имеют универсальную природу, и моделируются на основе некоторых рациональных приближений.

Для исключения мелкомасштабных пульсаций на этапе постановки задачи вводится оператор фильтрации по пространству, подавляющий коротковолновые составляющие турбулентного движения. При этом результирующая система уравнений оказывается незамкнутой, поскольку включают в себя члены, описывающие нелинейные взаимодействия с мелкомасштабной турбулентностью, лежащей за пределами пространственного шага  $\Delta$  модели.

Наиболее перспективным методом расчета течений любого типа является прямое численное моделирование (DNS – Direct Numeric Simulation). Однако в высоко турбулентных течениях вязкой жидкости присутствует широкий спектр турбулентных вихрей – от наиболее крупных до самых мелких, при этом характерное время мелкомасштабной турбулентности очень мало, хотя именно этот вид турбулентности играет важную роль при описании вязких турбулентных течений. Для того, что бы при моделировании учесть эти масштабы, необходимо использовать настолько мелкую сетку, что в настоящее время не хватает вычислительной мощности ни одного суперкомпьютера.

### 1.3. Особенности поперечного обтекания тел различной формы

Проблемы обтекания тел жидкостью и газом возникли из запросов практики во время зарождения высокоскоростных аппаратов, требующих учета возникающих в следе их движения вихревых структур и кавитационных эффектов, если такое движение происходит в воде.

Существуют обширные материалы по структуре потока и эффектам вихреобразования при поперечном обтекании, главным образом, круглого цилиндра в неограниченном потоке газа и меньше в жидкости. Этими вопросами занимались Л. Прандтль, М. Швабе, П. Чжен, Г. Шлихтинг, Ж.С. Акылбаев, А.А. Жукаускас, Э.Я. Эпик, Е.П. Дыбан и др. Большинство работ были посвящены вопросам улучшения тепло-массообменных процессов с поверхности цилиндрических тел обтекания, а также описанию интенсивности кавитационной эрозии на поверхности канала за плохообтекаемыми телами.

Процесс поперечного обтекания круглого цилиндра изучен наиболее широко. Это течение чрезвычайно сложно по своей природе и зависит от множества факторов: числа Рейнольдса  $Re$ , степени турбулизации набегающего потока, параметра загроможденности (ограниченности внешнего потока) и ряда других факторов.

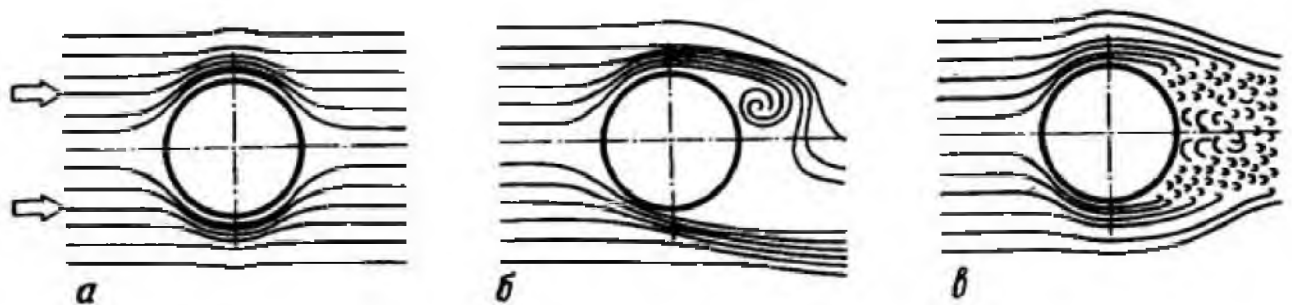


Рис. 1.9. Картина обтекания цилиндра при  $Re \approx 1$  (а),  $Re \leq 2 \cdot 10^5$  (б),  $Re \geq 4 \cdot 10^5$  (в) [58]

Согласно многочисленным исследованиям выделяют несколько режимов течения вокруг круглого цилиндра [55-58]. При минимальных значениях числа Рейнольдса  $Re \leq 1$  (рисунок 1.9 а) наблюдается только искривление линий тока около цилиндра и течение близко к невязкому потенциальному. При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса до  $Re \approx 2 \cdot 10^5$  (рисунок 1.9 б) происходит отрыв ламинарного пограничного слоя и формирование периодических вихревых



структур, срывающихся поочередно с обеих сторон цилиндра, образующих дорожку Кармана. Течение в этих режимах на поверхности цилиндра является ламинарным, а след за цилиндром – турбулентным. Структура потока при  $Re \geq 2 \cdot 10^5$  (рисунок 1.9 в) резко меняется, происходит переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный, область отрыва на донной поверхности цилиндра резко сокращается и падает его сопротивление. Данный режим еще называют «кризисом сопротивления». При этом наблюдается смещение точки отрыва потока с поверхности цилиндра  $\varphi = 80-85^\circ$  при докритическом течении, к  $\varphi \approx 140^\circ$  при турбулизации пограничного слоя, что и является причиной снижения сопротивления цилиндра (рисунок 1.10) [58,59].

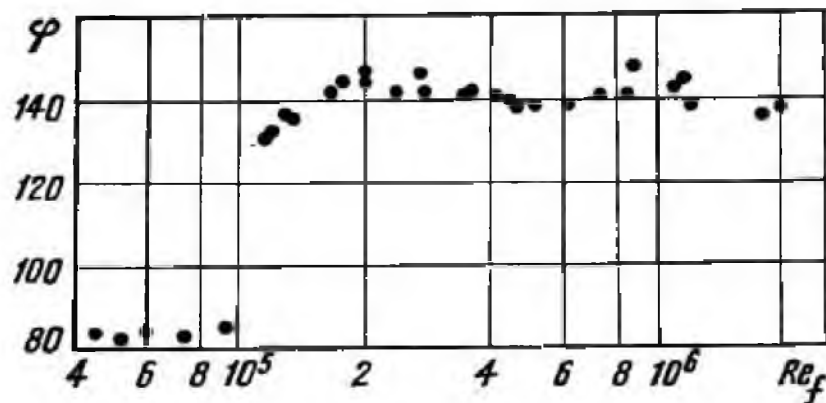


Рис. 1.10 Динамика точки отрыва пограничного слоя на поверхности цилиндра [58]

Как отмечалось ранее, структура течения в следе при поперечном обтекании цилиндра зависит от множества факторов.

Увеличение турбулентности внешнего потока  $Tu$  и шероховатости поверхности круглого цилиндра исследовались в ряде работ [61-64], и по данным [56,60] приводит к снижению сопротивления, что обусловлено изменением структуры ближнего следа, уровнем распределения давления на поверхности цилиндра и более ранним переходом ламинарного пограничного слоя в турбулентный. Причем эти данные немного рознятся. В работе [56] говорится, что увеличение турбулентности внешнего потока приводит к незначительному снижению общего уровня сопротивления давления (рисунок 1.11) и наблюдается при около критических числах Рейнольдса, хотя в [60] авторы утверждают, что

данный эффект более заметен (рисунок 1.12). В области ламинарного пограничного слоя при достаточно высокой внешней турбулентности сопротивление круглого цилиндра достигает величин, характерных для сверхкритического обтекания, когда на поверхности цилиндра формируется и отрывается турбулентный пограничный слой, причем снижение этих значений для фиксированных уровней турбулентности происходит на приблизительно равную величину в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса  $Re=10^3 \div 10^5$ .

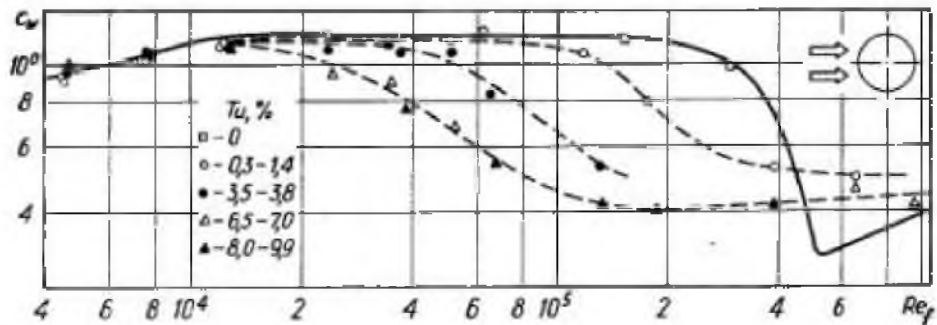


Рис.1.11. Влияние внешней турбулентности на сопротивление круглого цилиндра [56]

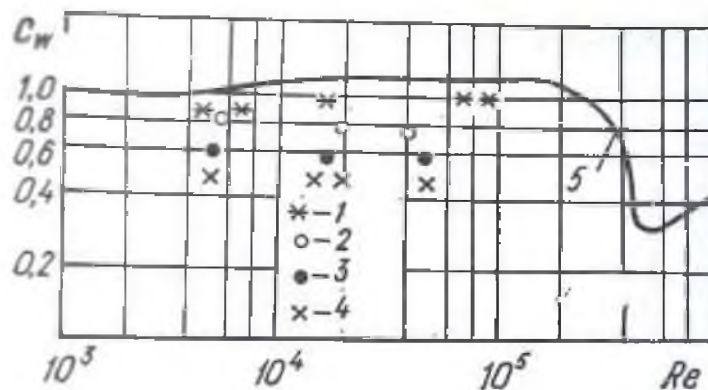


Рис.1.12. Зависимость сопротивления круглого цилиндра от числа Рейнольдса при различной турбулентности внешнего потока

(1 -  $Tu=0,3\%$ ; 2 -  $Tu=7,3\%$ ; 3 -  $Tu=14\%$ ; 4 -  $Tu=24\%$ ; 5 -  $C_w=f(Re)$ ) [60]

Существуют литературные данные, что степень турбулентности набегающего потока влияет на уровень статического давления в донной области и в ближнем следе за цилиндром [60]. На рисунке 1.12 приведено распределение давления по поверхности круглого цилиндра обтекающего воздухом при постоянной степени загромождения  $q=0,25$  (отношение поперечной площади тела к площади сечения канала).

Безразмерный коэффициент давления определяется как

$$\bar{P} = \frac{P - P_{\infty}}{\rho_{\infty} V_{\infty}^2 / 2} \quad (1.1)$$

где  $P$  – статическое давление в данной точке,  $P_{\infty}$ ,  $V_{\infty}$ ,  $\rho_{\infty}$  – давление, скорость, плотность внешнего потока (набегающего).

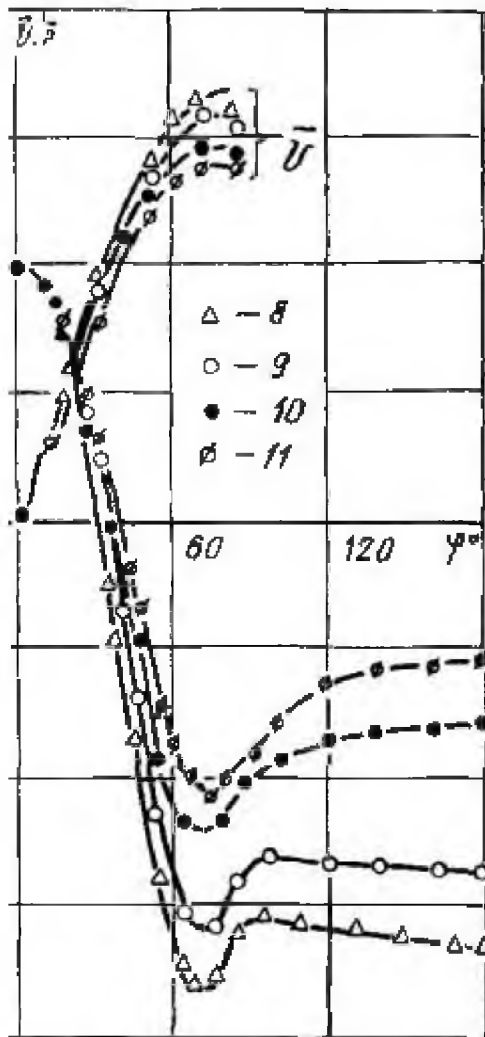


Рис. 1.13. Влияние числа Рейнольдса и степени турбулентности на распределение давления и скорости по периметру цилиндра при  $Re=1,8 \cdot 10^4$  (8 -  $Tu=0,3\%$ ; 9-  $Tu=6,7\%$ ; 10 -  $Tu=12\%$ ; 11 -  $Tu=23\%$ )

Как видно из рисунке 1.13 влияние степени турбулентности внешнего потока выражается в ослаблении разрежения в области отрыва потока и донной области круглого цилиндра. Так, например, разрежение в критической точке в случае  $Re=1,8 \cdot 10^4$  изменяется от  $\bar{P} = -1,6$  до  $\bar{P} = -0,5$  при  $Tu=0,3\%$  и  $Tu=23\%$ ,соответственно [60]. При этом наблюдается заметное расслоение коэффициента давления практически по всей поверхности цилиндра, но особенно в области отрыва пограничного слоя. В этих областях наблюдается резкая зависимость давления от числа Рейнольдса при постоянной степени турбулентности внешнего потока. На этой основе, авторами сделан вывод об утолщении характерного псевдоламинарного пограничного слоя с возрастанием  $Tu_{\infty}$ .

Авторами [60] также установлено, что увеличение степени турбулентности внешнего потока приводит к увеличению абсолютной интенсивности пульсаций скорости продольной компоненты в слое смешения  $\sqrt{u'^2}/U_\infty$ , что способствует повышению уровня турбулентных пульсаций в ближнем следе за цилиндром и тем самым интенсифицирует процессы переноса в данной области.

В литературе [60] отмечается, что изменение степени турбулентности внешнего потока вызывает изменение энергетических спектров турбулентных пульсаций скорости, что выражается в сохранении частоты отрыва регулярных вихрей с кормовой части цилиндра на уровне числа Струхалиа  $Sh=0,2$ , однако, при этом снижается амплитуда пика, т.е. уменьшается энергия, содержащаяся в регулярных вихревых структурах, что видно на рисунке 1.14. Это по мнению автора [65] является следствием нарушения регулярного отрыва вихрей.

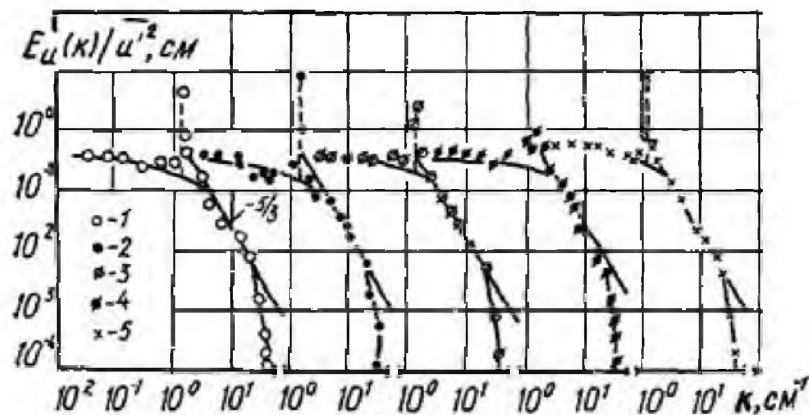


Рис. 1.14. Одномерные энергетические спектры продольной компоненты пульсаций скорости в ближнем следе за цилиндром  $d=10$  мм [60] (1 -  $Tu=0,3\%$ ; 2-  $Tu=7\%$ ; 3 -  $Tu=12,6\%$ ; 4 -  $Tu=23,8\%$  5 -  $L_w^2/d=1,18$ )

Исследования тел обтекания другой формы изучены не достаточно детально и по большей части содержат материалы по сопротивлению этих тел [66-68].

В проточных волновых генераторах тела обтекания находятся в достаточно ограниченном проходном сечении, что оказывает существенное влияние на характер обтекания цилиндра и формирование вихревых структур. По данным [60,62] с увеличением загромождения  $q=d/D$  коэффициент давления  $\bar{P}$  резко увеличивается (рисунок 1.15), где  $D$  – поперечное сечение свободного канала;  $d$  –

поперечное сечение тела обтекания. Например, увеличение коэффициента загромождения в 10 раз (от  $q=0.083$  до  $q=0.83$ ) приводит к увеличению разрежения до 130 раз (с  $\bar{P} = -0,73$  до  $\bar{P} = -96$ ). При этом точка минимума давления сдвигается вниз по потоку от  $\varphi=70^\circ$  до  $\varphi=90^\circ$ , а точка отрыва ламинарного пограничного слоя – от  $\varphi \approx 81^\circ$  до  $\varphi=95^\circ$ .

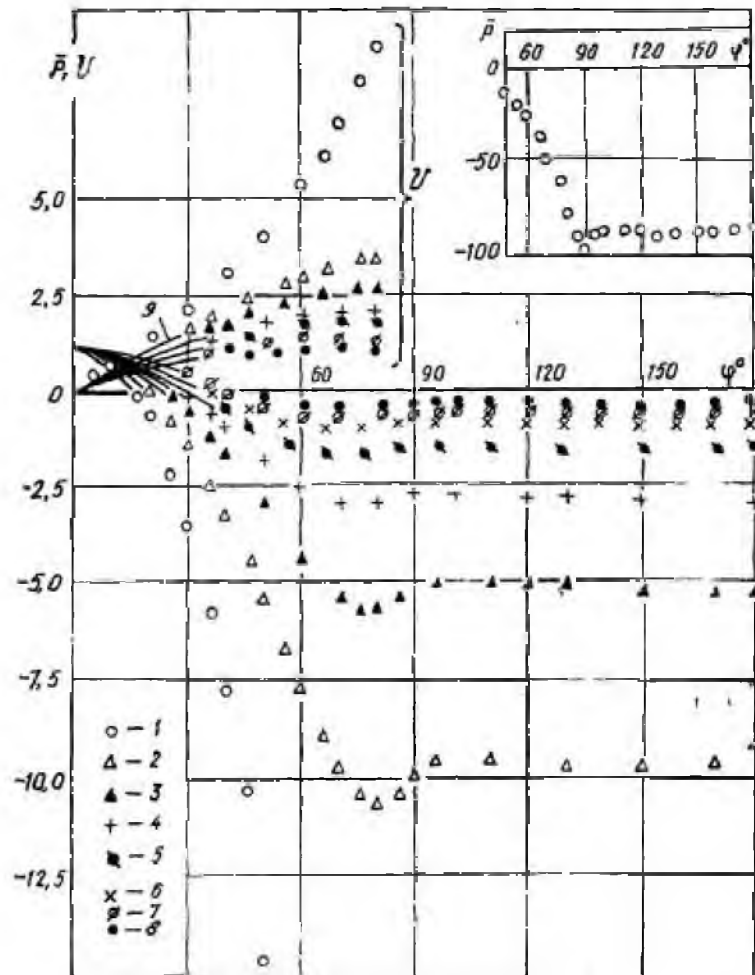


Рис.1.15. Влияние загромождения проходного сечения канала на распределения давления и скорости по периметру цилиндра ( $Tu_\infty=0,3\%$ ,  $Re=1,8 \cdot 10^4$ ):  
 1 –  $q=0,833$ ; 2 –  $q=0,609$ ; 3 –  $q=0,510$ ; 4 –  $q=0,415$ ; 5 –  $q=0,255$ ; 6 –  $q=0,2$ ;  
 7 –  $q=0,113$ ; 8 –  $q=0,083$  [59]

Сильное уменьшение коэффициента давления в кормовой части в основном обусловлено резким увеличением градиента скорости в лобовой части цилиндра, о чем свидетельствуют экспериментальные и теоретические зависимости [58].

Согласно исследованиям Ж.С. Акылбаева и др. [69] в исследуемом диапазоне докритических чисел Рейнольдса  $10^4 \leq Re \leq 1,2 \cdot 10^5$  степень

загромождения проходного сечения канала круглым цилиндром влияет на формирование отрывных зон и частоту срыва вихрей, выраженную в безразмерном числе Струхала  $Sh$  с учетом влияния загромождения канала  $q$ , по предложенной формуле:

$$Sh = 0,2 (1 + 7,25 \cdot q^{3,3}) \quad (1.2)$$

В литературе так же присутствуют противоречивые данные по влиянию расстояния от поперечно обтекаемого тела до боковой стенки на процесс вихреобразования. В исследованиях [70,71] не подтверждают какую-либо зависимость частоты срыва вихрей от расстояния до стенки. Хотя в работах [72,73] говорится об увеличении безразмерной частоты срыва вихрей при приближении круглого цилиндра к стенке канала.

Помимо вышеизложенных возмущающих факторов, в работах [74-76] были проведены исследования влияния неравномерности скорости набегающего потока, соответствующей профилю скорости развитого турбулентного течения в круглой трубе. Было установлено, что, несмотря на ограниченное течение и неравномерность турбулентного профиля скорости, за круглым цилиндром и плоской пластиной образуются регулярные вихри Кармана с характерной частотой на всей длине тел обтекания, что видно на рисунке 1.16. Здесь координата  $z$  отсчитывается от оси трубы по длине цилиндра. В [74, 75] говорится, что такой механизм формирования вихрей может быть обусловлен как преобладающим действием высокоскоростного потока в центре трубы на процесс вихреобразования, так и выравнивающим действием плохобтекаемого тела на поле течения перед ним. При этом наличие фиксированной точки отрыва потока с кромки пластины приводит к локализации основной части энергии пульсаций скорости в меньшей полосе частот (рисунок 1.16 б), чем при обтекании круглого цилиндра (рисунок 1.16.а).

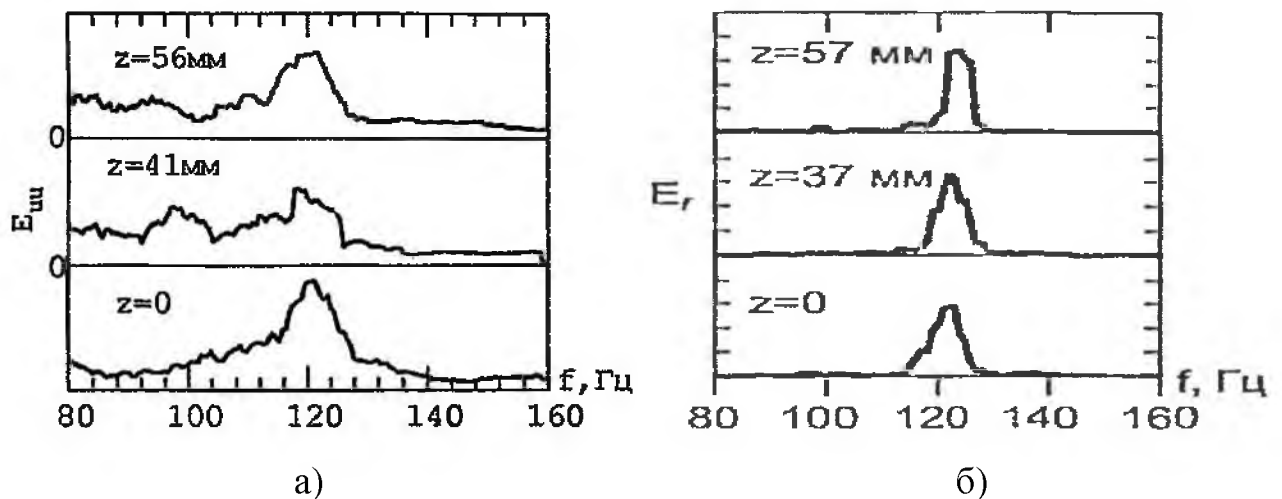


Рис.1.16. Спектральная плотность энергии пульсаций скорости потока вблизи поверхности поперечно обтекаемого цилиндра (а) и пластины (б) при  $Re=3,9 \cdot 10^4$

Так же остается открытым вопрос влияния различных турбулизирующих факторов (повышенная турбулентность набегающего потока и шероховатость на поверхности тела обтекания) на формирование вихревых структур при поперечном обтекании тел. Это явление мало изучено. Данный материал носит выраженный фундаментальный характер, а также важен для прикладного машиностроения.

#### 1.4. Выводы по главе 1. Постановка задач исследования

Опубликованные результаты исследований течения жидкости в основном посвящены обтеканию круглого цилиндра «неограниченным» потоком сжимаемого газа и редко жидкостью. Приведены экспериментальные и расчетные материалы по влиянию неравномерности скоростного профиля, степени турбулентности набегающего потока и степени загромождения сечения канала на условия поперечного обтекания тел.

Анализ этих материалов показал, что их недостаточно для создания эффективных проточных волновых генераторов с целью формирования тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся сред, что связано с наличием высокой турбулентности потока, отрывных и вихревых образований, а также обширных зон кавитации, которые существенным образом затрудняют проведение расчетных работ. Поэтому в связи с необходимостью оптимизации геометрических и гидродинамических параметров проточных волновых генераторов плоского типа для повышения эффективности их работы и снижения энергетических затрат, потребовалось проведение дополнительных экспериментальных исследований динамических процессов в проточных каналах этих устройств, включая изучение влияния кавитационных эффектов на приготовление тонкодисперсных, однородных и стабильных эмульсий из несмешивающихся жидкостей. Работа направлена на исследование, выявление рабочего диапазона динамических процессов и оптимизацию конструктивных решений проточной части волнового генератора с целью формирования тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся сред.

Все исследования базировались на многолетних теоретических наработках ИЦ НВМТ РАН в области нелинейных волновых эффектов в многофазных средах, на математическом моделировании процессов перемешивания и диспергирования, на результатах экспериментальных стендовых испытаний под руководством академика РАН Р.Ф. Ганиева [1-5].



На основании вышеизложенного основные задачи исследования можно сформулировать так:

1. Анализ состояния вопроса получения тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся сред, а также экспериментальных и теоретических данных для формирования тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся сред.
2. Разработка и модернизация гидродинамического стенда, отработка методик проведения экспериментальных исследований для получения тонкодисперсных, высокоомогенных эмульсий .
3. Проведение параметрических экспериментальных исследований динамических процессов работы проточных волновых генераторов с поверхностными вихрегенераторами и телами обтекания различной формы с нахождением оптимальных геометрических и гидродинамических характеристик.
4. Исследование кавитационных явлений с конкретизацией исходных граничных условий для расчета течений различных исходных компонент в генераторах приготовления эмульсий из несмешивающихся сред.
5. Экспериментальное исследование ряда промышленных рабочих сред (нефть, мазут, масла различной вязкости) для формирования в широком параметрическом диапазоне тонкодисперсных, высокоомогенных водяных эмульсий.
6. Разработка рекомендаций по внедрению генераторов в различных областях промышленности.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аналитический обзор существующих литературных источников по методам определения интенсивности кавитации в проточных течениях показал, что наиболее распространенными методами определения интенсивности кавитации является измерение уноса материала с поверхности образцов, выполненных из различных материалов, помещенных в кавитационные зоны. Кроме того по фотографиям визуализации потока прослеживалась картина течения при различных режимах работы волнового генератора, а также фиксировались нестационарные колебания давления при обтекании жидкостью тел различной формы.

### 2.1. Выбор геометрии проточной части волнового генератора

Формирование геометрии проточной части волнового генератора проводилось на основании имеющихся экспериментальных данных и расчетных исследований при различных начальных условиях, выполненных в ИЦ НВМТ РАН [1, 5].

Созданию экспериментальной модели волнового проточного генератора плоского типа предшествовал ряд математических расчетов с использованием выбранной формы канала волнового генератора, проведенные по методике RANS с учетом модели кавитации, представленных в литературе [1, 5]. На основании запатентованного прототипа [40] и работы [77] было выбрано плоское течение жидкости в канале прямоугольного сечения, который состоит из трех частей: суживающегося сопла и узкой части в начале канала, расширяющегося участка и широкой выходной части канала. Тракты имели следующие геометрические размеры: максимальная ширина 0.036 м, минимальная ширина 0.022 м, длина 0.189 м. Препятствие представлено в двух вариантах:

- тракт №1. Первый ряд из двух цилиндров диаметром 0.006 м и второй ряд из четырех цилиндров диаметром 0.006 м;

- тракт №2. Первый ряд из одного цилиндра диаметром 0.012 м и второй ряд из двух цилиндров диаметром 0.012 м. Расположение тел обтекания было выбрано таким образом, что бы цилиндры второго ряда находились на пути движения вихрей, образующихся за цилиндром первого ряда.

Геометрическая форма рабочего участка трактов приведена на рисунках 2.1-2.2.

Согласно предложенным моделям проточных каналов были проведены численные исследования течения жидкости (воды) в смесительных установках при различных начальных условиях. Течение жидкости принято изотермическим при температуре  $T = 300^{\circ}\text{K}$ . Давление на выходе из трубы во всех случаях выбиралось постоянным и равным  $P_{\text{out}} = 1.5$  атм. Давление на входе изменялось в пределах от  $P_{\text{in}} = 2$  атм до  $P_{\text{in}} = 13$  атм. Результаты предварительного математического моделирования и сравнения эффективности двух принятых моделей проточного канала представлены в таблице 2.1.

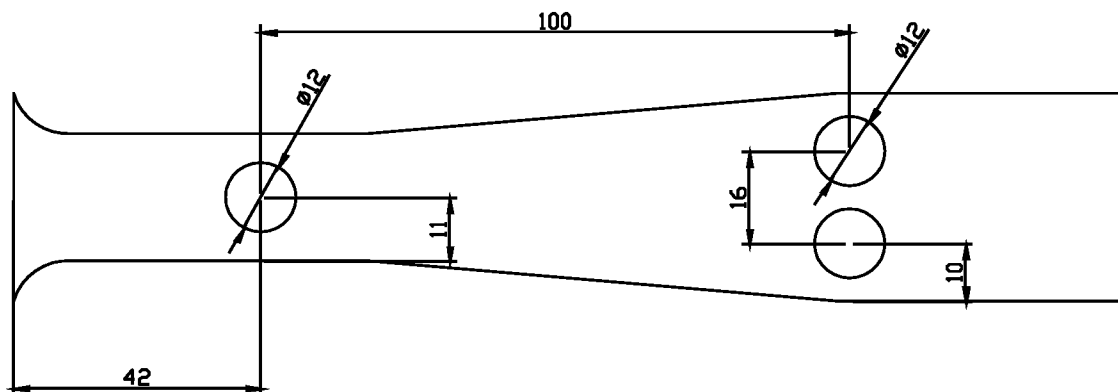


Рис. 2.1. Геометрия проточного тракта №1

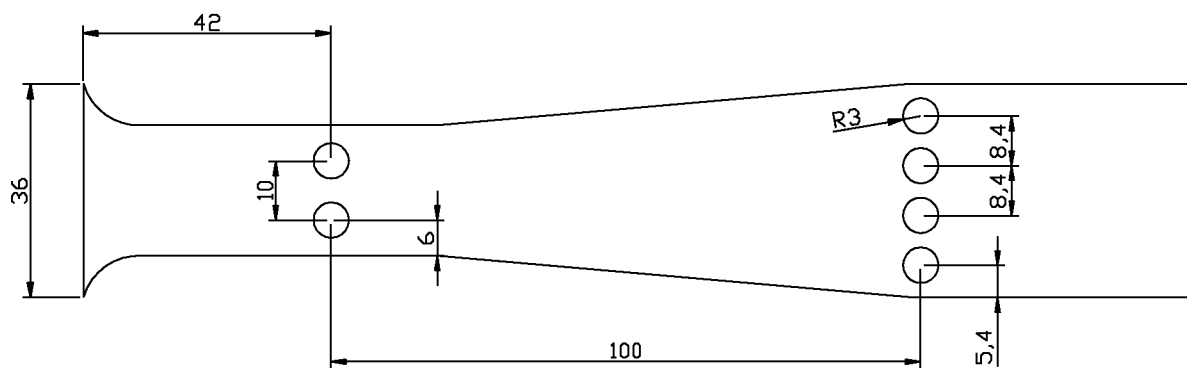


Рис. 2.2. Геометрия проточного тракта №2

Результаты предварительного математического расчета

№	№ варианта	$v_{in}$ м/с	$Re_{in}$ $\times 10^5$	$v_{max}$ м/с	$P_{in}$ атм	$v_{vs}$ $1/c, \times 10^3$	$Re$ $\times 10^5$	$L_{z_1}$ м	$L_{z_2}$ м
1	1	7.32	1.61	19.43	2.21	0.00	0.88	0.000	0.00
2	1	10.25	2.26	28.48	4.34	0.75	1.23	0.019	0.00
3	1	15.85	3.49	41.38	7.89	0.89	1.90	0.023	0.01
4	1	19.20	4.22	50.61	12.85	1.31	2.30	0.041	$\infty$
5	2	7.66	1.69	18.33	2.21	0.00	0.46	0.000	0.00
6	2	11.29	2.48	28.22	4.34	0.81	0.67	0.005	0.00
7	2	15.45	3.40	38.63	7.89	0.98	0.93	0.006	$\infty$

Здесь

$v_{in}$  – средняя скорость набегающего потока перед первым рядом цилиндров;

$v_{vs}$  – частота срыва вихрей;

$L_{z_1}$  – размер зоны кавитации после первого ряда цилиндров;

$L_{z_2}$  – размер зоны кавитации после второго ряда цилиндров.

Из результатов численного моделирования течения жидкости видно, что при низких числах Рейнольдса (номера 1 и 5) набегающего потока кавитация не образуется, и, соответственно, нет условий волновой кавитационной обработки. При увеличении  $Re_{in}$  происходит рост зоны кавитации за первым рядом цилиндров, но за вторым рядом зона кавитации практически отсутствует. При дальнейшем увеличении  $Re_{in}$  за вторым рядом цилиндров резко образуется зона сплошной кавитации (она в таблице обозначена как  $\infty$ ), которая распространяется на всю расчетную область. При моделировании получено, что с ростом скорости набегающего потока происходит рост кавитационных зон, пока при некотором значении скорости за вторым рядом цилиндров не образуется зона сплошной кавитации. Причем для второго варианта установки возникновение зоны сплошной кавитации происходит при меньшем значении скорости. Хотя за первым рядом цилиндров в варианте 1 при одинаковых входных параметрах (номера 3 и 7) образуется зона кавитации, размер которой, по мнению авторов [77], является более оптимальным с точки зрения интенсивности протекания

кавитационных процессов, что способствует созданию тонкодисперсной качественной эмульсии.

Для учета особенностей перемешивания в проточных трактах бы выбран критерий перемешивания  $D_Q$ , основанный на величине расхода примеси, отнесенного к расходу жидкости через сплошную площадку выходного сечения за заданный интервал времени:

$$Q_i = \frac{S_i}{q_i}, \quad M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i, \quad \sigma_Q = \frac{1}{M} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - M)^2}, \quad D_Q = 1 - \frac{1}{1 + \alpha \cdot \sigma_Q},$$

где  $S_i$  – площадь маркеров, прошедших через площадку  $h$  за время  $\delta$ ,

$q_i$  – расход жидкости, проходящей через площадку  $h$  за время  $\delta$ ,

$Q_i$  – безразмерный расход смеси за время  $\delta$ ,  $n$  – число единичных площадок,

$M$  – математическое ожидание величины  $Q_i$ ,  $\alpha = 1/3$  – скалярный калибровочный параметр.

После завершения переходного этапа, связанного со стартом течения, поведение вихревых структур принимает ярко выраженный периодический характер. Это проявляется и в динамике критерия  $D_Q$ , который для каждого течения имеет свой собственный период.

Исследование динамики критерия качества перемешивания для трактов № 1 и 2 не выявило периодического поведения течения за рассмотренные интервалы времени. Более того, течение в тракте №2 установилось, что, вероятно, было вызвано избыточной турбулентной вязкостью. Из-за отсутствия периодичности усреднение критериев проводилось по всему временному интервалу.

Усредненные критерии качества перемешивания оказались равны 0,417 и 0,452 соответственно. Сравнение критериев показало, что предпочтительнее использовать тракт №1, в котором проявляется эффект дробления крупных вихревых структур. На рисунка 2.3-2.6 представлены расчетные картины полей завихренности, перемешивания и динамики критерия перемешивания  $D_Q$  для трактов №1 и 2.

В результате расчетов было получено, что наилучшее перемешивание достигается при наличии в картине течения крупномасштабных вихревых структур. Отсутствие таких структур, напротив, приводит к плохому перемешиванию. При этом включение турбулентных пульсаций в математическую модель переноса и деформации контура, само по себе, не способствует крупномасштабному перемешиванию. Установлено, что центр вихревой структуры является эллиптической особой точкой. Размещение препятствий является оптимальным, если происходит разбиение крупных вихревых структур, что, в свою очередь, повышает качество перемешивания на выходе из проточного тракта [1, 5].

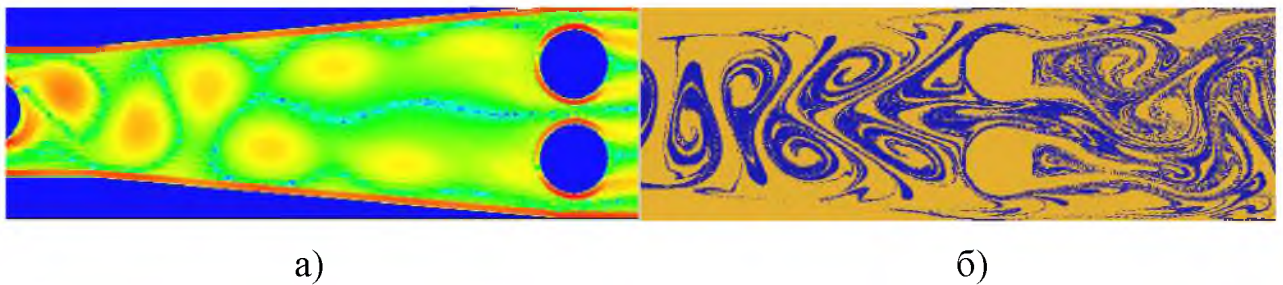


Рис. 2.3. Поле завихренности (а) и картина перемешивания (б) в тракте №1

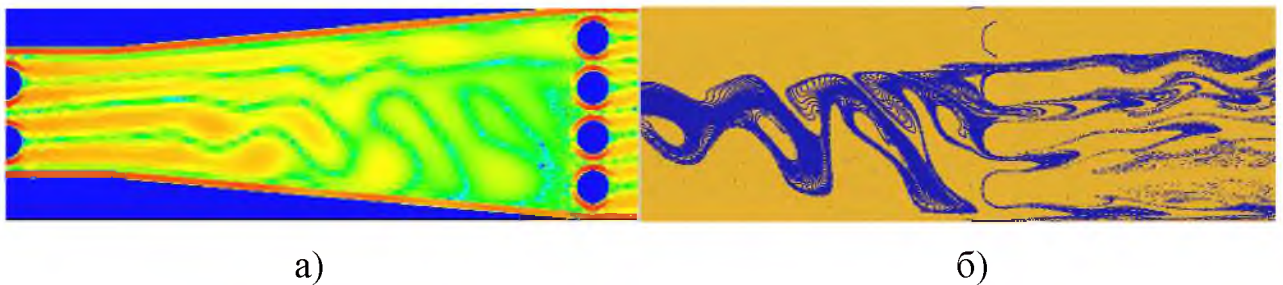


Рис. 2.4. Поле завихренности (а) и картина перемешивания (б) в тракте №2

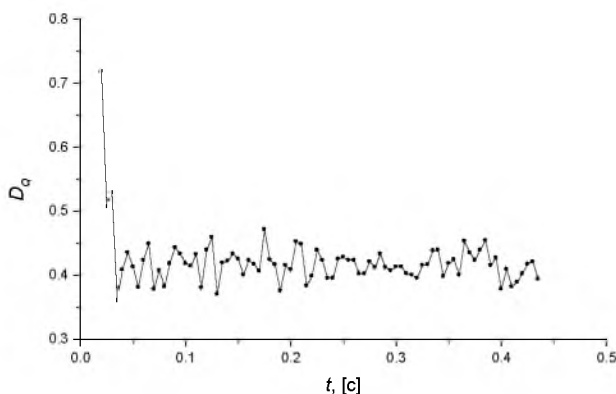


Рис. 2.5. Динамика критерия перемешивания в тракте №1

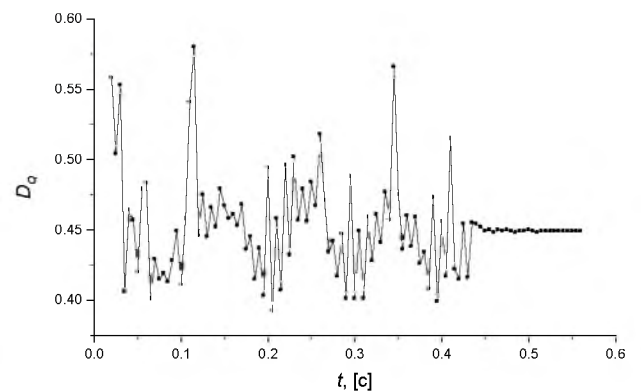


Рис. 2.6. Динамика критерия перемешивания в тракте №2

На основе математического моделирования был выбран прямоугольный профиль переменного сечения с телами обтекания различной формы в качестве экспериментальной модели канала проточного волнового генератора плоского типа.

## 2.2. Проектирование и монтаж экспериментального гидродинамического стенда

Исследования плоского генератора проточного типа с различными телами обтекания проводились на гидродинамическом стенде (СТ-3), входящего в состав экспериментальной базы НЦ НВМТ РАН. Эта установка обеспечивает большие расходы рабочего тела (до 500 л/мин) и позволяет воспроизводить натурные параметры гидродинамических процессов, реализуемых на промышленных объектах теплоэнергетики. Принципиальная схема стенда приведена на рисунке 2.7.

Из емкостей (1) жидкость насосом (2) (вертикальный центробежный насос ESPA VE 121 8), подается на вход генератора (3) и вытекает обратно в емкости. Выбор вариантов использования рабочих емкостей производится с помощью вентиля (5) и (9). При этом вентилями (9) можно изменять перепад давления на генераторе и расход жидкости. Расход и давление, создаваемое насосом, регулируется электронным частотным преобразователем. Давление на входе и на выходе измеряется с помощью манометров (7) и (8) соответственно. Измерение температуры производится с помощью термометров сопротивления ТС224-100М.В4.43/4 (11), установленных на поверхности металлических магистралей перед и за генератором. Для регистрации и преобразования сигнала используется цифровой измеритель-регистратор ИС-203.3. Измерение расхода производится механическим расходомером (4) ВСК М90-50 и секундомером.

Объем каждой емкости составляет 200л. Для поддержания постоянной температуры рабочей среды ( $\approx 25 \pm 5$  °С) в одной из них предусмотрена система охлаждения с помощью радиатора и охлаждающей водопроводной воды. Слив потока жидкости в емкости осуществляется по касательной для безударного

втекания струи внутрь емкости. Предотвращение образования воронки и попадания воздуха в насос обеспечивается устройством в виде перфорированного алюминиевого листа, установленного в емкости навстречу втекающей струе. Уровень перфорации листа подобран таким образом, чтобы с одной стороны жидкость не закручивалась в емкости, а с другой - происходило ее перемешивание во всем объеме.

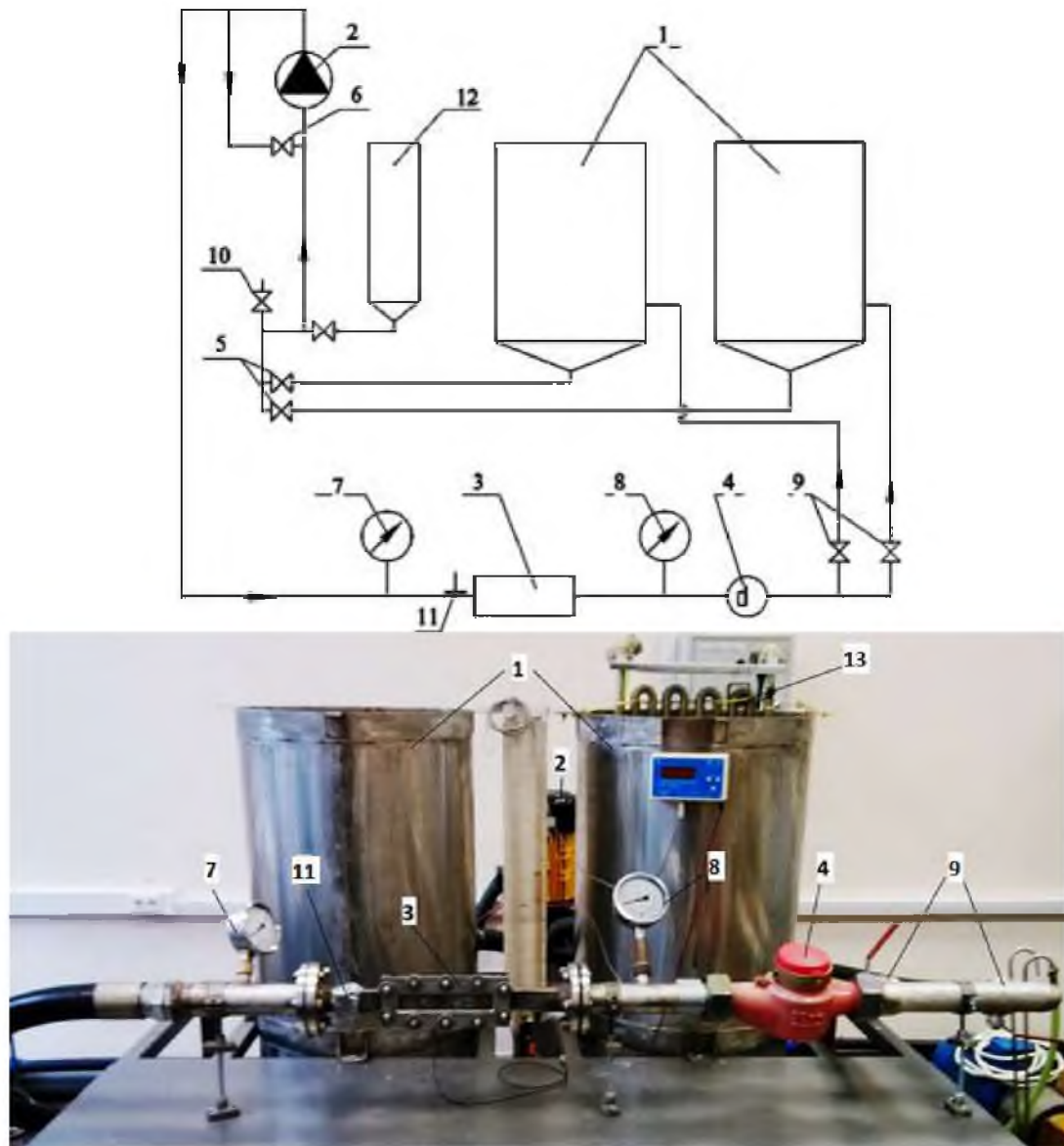


Рис. 2.7. Принципиальная схема и фотография гидродинамического стенда  
 1 – емкости с основной жидкостью; 2 – вихревой насос; 3 – проточный генератор;  
 4 – расходомер; 5 – входные вентили; 6 – вентиль рециркуляции насоса; 7 – манометр ( $P_{вх}$ ); 8 – манометр ( $P_{вых}$ ); 9 – выходные вентили; 10 – дренаж; 11 – датчик температуры; 12 – емкость с добавочной жидкостью; 13 – система охлаждения.



В качестве рабочей жидкости использовалась обычная водопроводная вода, без предварительной очистки и дегазации. В рабочую емкость наливалось минимум 100л воды, для предотвращения захвата воздуха при сливе ее после волнового генератора.

Генератор представляет собой плоский профилированный канал с телами обтекания различной формы: цилиндр, цилиндр с насечкой, пластина, серп, стакан (рисунок 2.8). Насечка на цилиндре выполнена сетчатой по ГОСТ 21474-75. Размер тел в поперечном сечении канала (калибр) одинаков. В канале генератора предусмотрены различные конструктивные решения для получения данных при проведения экспериментальных исследований по:

- проведению исследований на возникновение и развитие кавитации в камере генератора. В этом случае в отверстие в стенке генератора заподлицо с ней устанавливался свинцовый диск с механически обработанной внешней поверхностью (1, рисунок 2.8);
- измерению пульсаций давления в потоке. В этом варианте в центре съемного диска устанавливался заподлицо с внутренней поверхностью генератора пьезоэлектрический датчик давления 701К фирмы Kistler (2, рисунок 2.8), диаметр мембраны которого равен 9,5 мм. Регистрация измерений и получение амплитудно-частотной характеристики с помощью преобразований по функции Фурье производились на цифровых осциллографах LeCroy и Gould;
- измерению статического давления в следе за телом обтекания. Для этого в этом отверстии используется вставка с дренажными трубками размером 2x0,5 мм (4, рисунок 2.8).

Перед проведением экспериментов были проведены замеры давления воды на входе в насос. При расходе жидкости  $G=250$  л/мин через генератор давление во входном патрубке насоса составляло 0,075 МПа, что значительно выше давления парообразования (4,3 кПа при 30 °С) [78].

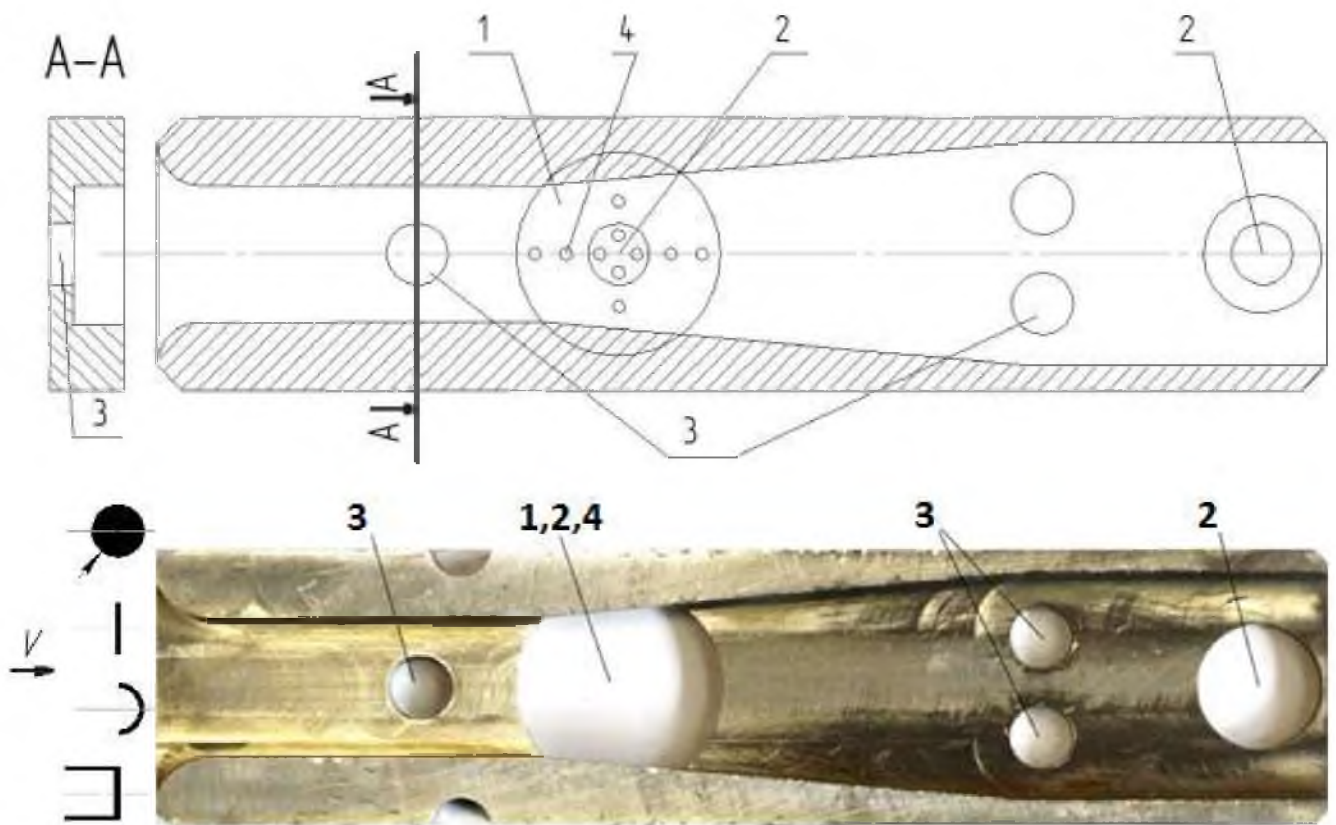


Рис. 2.8. Принципиальные схемы проточного канала, тел обтекания и сам канал плоского проточного генератора

1 – контрольная вставка; 2 – пьезоэлектрический датчик переменного давления;  
3 – места установки тел обтекания; 4 – точки замера статического давления

Исследования проводились при давлении на входе в генератор  $P_{вх} = 0,12 - 1,1$  МПа, что соответствует максимальному расходу воды до 230 л/мин. Расчетные оценки показали, что скорость набегающего потока в генераторе перед телами обтекания при этом составляет около 22 м/с.

При расходах  $Q = 170 - 230$  л/мин число Рейнольдса  $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$  набегающего потока перед телами обтекания составляет  $Re = (1,6 - 2,2) \cdot 10^5$ , где  $v$  – скорость набегающего потока (м/с),  $d$  – поперечный диаметр тел обтекания (калибр) (м),  $\nu$  – кинематическая вязкость воды (м<sup>2</sup>/с).

### 2.3. Разработка методики визуализации потока жидкости в канале волнового генератора плоского типа

Изучению физической и гидродинамической природы кавитационных явлений, а также исследованию широкого спектра их проявлений, таких как разрушение материалов, кавитационный шум и вибрация, изменение физических и химических свойств многофазных сред и др., во многих странах уделяется значительное внимание. В первую очередь это касается разработки новых методов и совершенствования существующих методов и средств исследования кавитации.

Процесс кавитации можно разделить на два этапа. Первый этап – это разрыв сплошности рабочей среды и образование в потоке кавитационной пелены, представляющей собой смесь газовых пузырьков различного размера и жидкости. Наличие кавитационной пелены в потоке рабочей жидкости свидетельствует о существовании кавитационного процесса в проточных каналах генераторов.

При проведении экспериментальных работ применена методика оптической визуализации потока, позволяющая регистрировать зарождение и развитие кавитационной пелены. При этом в плоском генераторе одна из стенок была выполнена из оптически прозрачного оргстекла. Другая стенка генератора была покрыта черной матовой краской, устойчивой к воздействию рабочей среды. Оптическая система подсветки представляла собой прожектор с лампой 600Вт, и была настроена таким образом, чтобы видны были только парогазовые пузырьки, образующиеся в результате разрыва сплошности среды, при обтекании тел различной формы. Разработана конструкция стендовой оснастки, позволяющая разместить оптическую систему так, чтобы подсветка не создавала посторонних бликов.

Регистрация картин течения потока в проточных каналах генераторов производилась с помощью цифровой фотокамеры, а также высокоскоростной кинокамеры Citius Imagine C10 с возможностью снимать видео до 10 000 кадров/с. После отладки этой технологии стало возможным определять начало, развитие и завершение кавитационного процесса.

#### 2.4. Методика определения интенсивности кавитационных процессов и их связь с амплитудно-частотными характеристиками

Схлопывание газовых пузырьков кавитационной пелены при попадании их в зону повышенного давления – это второй этап процесса кавитации. При схлопывании пузырьков в пристеночной части проточной системы генераторов происходит разрушение конструкции. Основываясь на этом явлении, был применен метод, характеризующий интенсивность кавитации, по измерению уноса частиц материала с поверхности контрольных образцов, размещенных в зонах кавитации [16, 79]. После проведения серии экспериментов на контрольных образцах, выполненных из различных материалов: алюминия, оргстекла, свинца, меди, нержавеющей стали был выбран свинец в качестве материала для изготовления контрольных образцов (рисунок 2.9).



Рис. 2.9. Фотография контрольного свинцового диска

В процессе экспериментов было выбрано оптимальное время проведения испытаний образцов, установленных в проточных частях генераторов с точки зрения получения более объективного результата по интенсивности кавитации и возможности непрерывной работы гидродинамических стендов, которые должны обеспечивать постоянными заданные параметры рабочей среды: давление, температуру и расход в течении времени эксперимента. Это время составляло 1 час, при этом температура рабочей жидкости поддерживалась на уровне  $t \approx 25 \pm 5$  °С, при которой значения вязкости и плотности воды остаются практически неизменны.

Диски вырубались из свинцового листа с последующей механической обработкой рабочей плоскости. Образец устанавливался заподлицо с дном за первым обтекаемым телом в проточной части плоского генератора (рисунок 2.2) с обратной стороны канала и фиксировался с одной стороны стенками канала, а с другой плоским листом железа. Таким образом, данная свинцовая вставка полностью повторяла часть дна проточного канала.

Перед проведением экспериментов свинцовую вставку отмывали от загрязнений при производстве, помещали в спиртовую ванну для удаления остатков воды и взвешивали на весах AND MS-70 moisture analyzer, которые позволяют нагревать взвешиваемый образец для дополнительного удаления жидкости, оставшейся на поверхности. Производились шесть замеров массы свинцовой вставки, и за искомую величину принималось среднее арифметическое значение всех замеров.

Затем эта вставка помещалась в отверстие в стенке канала без зазоров. Эксперимент проводился в течение 1 часа с контролем величины входных и выходных давлений, расхода жидкости через волновой генератор, а также температуры рабочей среды.

После часа работы установки на выбранном режиме, внешняя крышка снималась, контрольная вставка вынималась, промывалась в спирте, высушивалась и взвешивалась. Разницу в массе  $\Delta m$  принимали в качестве показателя интенсивности кавитации.

Кроме того по фотографиям образцов измеряли площади, занимаемые кавитационным уносом, и по этим данным получали сравнительную оценку кавитации для различных тел обтекания и режимов.

Достаточно небольшой размер контрольного свинцового диска привел к изменению компоновки контрольной вставки. Было решено увеличить ее размер для более детального получения экспериментальных материалов по зависимости интенсивности кавитационного уноса от теплофизических параметров течения жидкости (рисунок 2.10.)



Рис. 2.10. Контрольный свинцовый образец увеличенного размера

Измерения проводились по методике описанной выше, при этом взвешивание свинцовой вставки осуществлялось на электронных весах Axis AGN200.

Дополнительным индикатором существования нестационарных периодических волновых эффектов является наличие в спектре колебаний пиков давления с частотой в диапазоне  $f=0,2-10$  кГц. В связи с этим в генераторе за телами обтекания было предусмотрено размещение датчиков переменного давления Kistler 701A, диаметр мембраны которого равен 9,5 мм. Регистрация измерений и получение амплитудно-частотной характеристики с помощью преобразований по функции Фурье производились на цифровых осциллографах LeCroy и Gould.

#### 2.5. Разработка методики определения влияния кавитации на формирование тонкодисперсных эмульсий

Для изучения влияния кавитации на эффективность смешения различных сред производились опыты по смешиванию масел различной вязкости (индустриального масла марки И-50А, подсолнечного масла, турбинного масла марки ТП-22с, трансформаторного масла ГК) с водой в присутствии эмульгатора. Количество масла составляло ~5%. Эмульгатор добавлялся в количестве ~0.1%.

Масло подавалось самотеком перед вихревым насосом, за счет небольшого разрежения на всасе. Скорость добавления масла регулировалась шаровым краном и поддерживалась на уровне 5% от объемного расхода основной жидкости – водопроводной воды.

В ходе эксперимента отбирались пробы получившейся эмульсии в течение 10, 15 и 20 минут от начала подачи масла. Капля эмульсии из каждой пробы наносилась на предметное стекло. Наблюдение за дисперсностью производилось на микроскопе Zeiss Scope A.1 с 100х-кратным увеличением и видеокамерой Zeiss, что позволяло сделать снимки и просматривать пробы на компьютере в программе Axio vision Rel.4.8. Использование данного микроскопа позволяет увидеть частицы размером до 1 мкм.

Обработка полученных фотографий производилась в разработанной в НЦ НВМТ РАН программе подсчета капель эмульсии Dropcounter. В программе задаются цвета контура и фона капли. Программа автоматически обводит сферические капли в соответствии с выбранной цветовой гаммой. Также возможно и ручное уточнение размера капель. Все выбранные размеры заносятся в таблицу и сохраняются в виде текстового файла.

По результатам эксперимента строились зависимости по относительному количеству капель эмульсии от размера капли  $q_i/Q \cdot 100 = f(d)$ , по массовой доле капель  $m_i/M \cdot 100 = f(d)$ , а также интегральная кривая распределения по количественной  $\sum_{k=0}^i q_k/Q$  и по массовой доле  $\sum_{k=0}^i m_k/M$  капель, где  $d$  – диаметр капли масла,  $q_i$  – количество капель масла, имеющих диаметр от  $d_i$  до  $d_{i+1}$ ,  $m_i$  – масса капель масла, имеющих диаметр от  $d_i$  до  $d_{i+1}$ ,  $Q$  – полное число капель на фотографии,  $M$  – полная масса капель на фотографии.

По построенным зависимостям выявлялись наиболее эффективные режимы работы проточного волнового генератора и конструктивные решения проточного генератора.

## 2.6. Методика измерения статического давления в следе за телами обтекания.

В зависимости от скорости потока жидкости в следе за телами обтекания образуются зоны пониженного давления. Известны работы [55, 56, 66] где приведены данные по распределению статического давления в следе за цилиндром и на его поверхности для однофазного потока – воздуха. При течении

жидкости, наличие зон пониженного давления может приводить к разрыву среды и образованию паровой фазы. Двухфазные течения обладают иной динамикой, поэтому знание полей статического давления является важным фактором при математическом расчете течений жидкости и проектировании гидродинамических аппаратов.

Измерение статического давления проводилось в следе за первым телом обтекания. Для этого была разработана и изготовлена специальная вставка (4 рисунок 2.8), в которой были установлены 3 дренажных трубки размером 2x1 мм, изготовленных из отожжённой меди, что давало возможность придавать им нужную форму. Форма вставки позволяла поворачивать ее на 90, 180, 270 градусов и при этом получить 6 значений статического давления вдоль оси проточного канала и 4 значения давления поперек канала.

Измерения статического давления проводились в точках по оси канала с безразмерными координатами  $L^*$  рассчитанными по формуле:

$$L^* = \frac{l_i}{d}, \quad (2.1)$$

где

$l_i$  – расстояние от места сечения отрыва потока до сечения точки измерения давления;

$d$  – поперечный размер тел обтекания (калибр).

Поперек канала измерения статического давления проводились на безразмерных координатах  $H^*$ :

$$H^* = \frac{h_i}{z}, \quad (2.2)$$

где

$h_i$  – расстояние от оси канала до точки измерения давления;

$z$  – ширина канала в поперечном сечении измерения.

## 2.7. Расчет энергетических затрат работы волнового генератора

Основным показателем эффективности работы проточных смесительных устройств наравне с качеством получаемых эмульсий является показатель



экономичности или объем энергозатрат на работу проточного волнового генератора. В качестве данного критерия был выбран показатель мощности, которую необходимо дополнительно затратить для преодоления сопротивления волнового смесителя, работающего на заданных параметрах рабочей среды (раздел 2.2). Дополнительные затраты мощности рассчитывались по формуле [80]:

$$W = \frac{(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) \cdot V}{\eta_{\text{н}}}, \text{ Вт} \quad (2.3)$$

где  $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})$  – перепад давления на проточном волновом генераторе, Па;

$V$  – объемный расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $\eta_{\text{н}}$  – КПД насоса

## 2.8. Погрешности измеряемых величин

Давления на входе и на выходе из волнового генератора измерялись с помощью манометров, диапазон измерения которых до 1,0 МПа, классом точности 1, с абсолютной погрешностью прибора  $\Delta P = \pm 0,01$  МПа.

Температура рабочей среды измерялась поверхностным термометром сопротивления ТС224-100м, диапазон измерения  $-50 \dots +180$  °С и погрешностью измерений  $t = \pm 0,1$  °С, с отображением на измерителе регистраторе ИС-203.4.

Расход жидкости через волновой генератор определялся с помощью механического расходомера ВСК М90-50, рассчитанного на 0,250 м<sup>3</sup>/мин с погрешностью измерения  $\Delta G = \pm 0,003$  м<sup>3</sup>/мин и ручного секундомера.

Статические давления за телами обтекания измерялись в области отрицательных давлений вакуумметрами ВТИ с диапазоном измерения  $0 \dots -0.1$  МПа, классом точности 0.6, и погрешностью прибора  $\Delta P = \pm 0,0005$  МПа, а при избыточных статических давлениях измерения проводились преобразователями избыточного давления ПДТВХ-1, с отображением на измерителе регистраторе ИС-203.4 с погрешностью измерений  $\Delta P = \pm 0,01$  МПа.

Измерение массы контрольных вставок производились на весах AND MS-70 и Axis AGN200, с погрешностью измерения  $\Delta m = \pm 0,1$  мг.

## 2.9. Выводы по главе 2

1. Дано описание разработанной экспериментальной установки и хода проведения основных работ.
2. Приведены методики проведения экспериментальных работ на гидродинамическом стенде по исследованию динамики течения жидкости в плоском проточном волновом генераторе при обтекании тел различной формы.
3. Применены методики визуализации потока, получения экспериментальных данных о влиянии теплофизических параметров работы генератора на интенсивность кавитации с фиксацией амплитудно-частотных характеристик пульсаций давления в следе за телами обтекания.
4. Разработана методика получения дисперсионных характеристик экспериментальных эмульсий с использованием оригинального программного обеспечения.
5. Приведены погрешности измеряемых экспериментальных параметров.

### ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ПРОТОЧНОМ ВОЛНОВОМ ГЕНЕРАТОРЕ ПЛОСКОГО ТИПА

В данной главе представлены материалы параметрических исследований течения жидкости и возникающих кавитационных явлений при обтекании тел различной геометрии в плоском профилированном канале в зависимости от гидродинамических и теплофизических параметров работы волнового генератора. Этот материал позволяет получить представление о течениях, возникающих в узких плоских каналах при обтекании тел жидкостью, о влиянии волновых и кавитационных эффектов на формирование тонкодисперсных высокоомогенных водомасляных эмульсий, а также позволяет определить характеристики волновых генераторов, направленных на решение актуальной задачи совершенствования процессов и разработку фундаментальных основ конструкций аппаратов проточного типа, реализующих эффекты нелинейной волновой механики для получения высокодисперсных эмульсий из нерастворимых друг в друге компонент жидких смесей. Такой подход позволяет улучшить технологические процессы нефтепереработки, сжигания энергетических топлив, повышения экологических показателей и надежности работы оборудования [81-87].

#### 3.1. Экспериментальное исследование течения жидкости в проточном генераторе с визуализацией потока при обтекании тел различной формы

Фотографии картин визуализации кавитационных зон в плоском проточном волновом генераторе с телами обтекания: цилиндр, цилиндр с насечкой, пластина, серп, стакан - получены при  $(P_{вх}-P_{вых})/P_{вх}=0,1-0,9$  и расходом до 240 л/мин ( $Re=2,27 \cdot 10^5$ ), приведены на рисунках 3.1-3.2, а также в приложении 1 (рисунок 1-11).

Методика проведения экспериментальных исследований визуализации кавитационных зон (каверн) в проточном генераторе приведена в разделе 2.3. Разработанная методика позволяет определить параметры потока в начале и при развитии кавитации, а также форму и размеры кавитационной пелены.

На фотографиях визуализации видно, что за телами обтекания образуются области, хорошо рассеивающие луч света от системы подсветки, направленной под углом к задней стенке канала. Это кавитационная пелена, являющаяся смесью газа и жидкости, образующаяся в результате разрыва сплошности жидкости при достижении давления в потоке ниже или равного величине давления насыщения пара при данной температуре потока.

Характерные визуализационные картины кавитационных зон позади различных тел обтекания при переменном давлении на выходе из генератора  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$  представлены на рисунке 3.1.

При малых перепадах давления на генераторе  $(P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}})/P_{\text{ВХ}}$  с установленными в него в два ряда телами обтекания – гладкий цилиндр, свойственно наличие кавитационной пелены только за первым рядом тел, начало формирования которой отмечалось при  $(P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}})/P_{\text{ВХ}} = 0,45$ , тогда как для разрыва потока за вторыми рядами тел не хватает локального перепада давления на цилиндрах для ее формирования. При  $(P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}})/P_{\text{ВХ}} = 0,51$  наблюдалось перекрытие траекторий вихрей с образованием двойного хвоста в месте схлопывания кавитационных пузырьков. Дальнейшее увеличение перепада давления на генераторе приводило к появлению и образованию сплошной кавитационной пелены, занимающей все проходное сечение генератора. При этом наблюдается прекращение роста кавитационной зоны за первым телом.

Обтекание одиночного цилиндра имеет схожий характер, однако, из-за отсутствия второго ряда тел за цилиндром образуется объемная кавитационная пелена при более низких перепадах давления на генераторе и достигает максимально видимой длины при  $(P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}})/P_{\text{ВХ}} = 0,67$ . При  $(P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}})/P_{\text{ВХ}} = 0,58$  в донной области за одиночным цилиндром начинает формироваться зона, не содержащая парогазовые пузырьки, рассеивающие свет от подсветки, что хорошо видно на фотографии при  $(P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}})/P_{\text{ВХ}} = 0,62$  (рисунок 3.1).

Данный эффект может иметь 2 результата. Либо в этой зоне находится жидкость, не содержащая парогазовых кавитационных пузырьков, либо в ней находится воздух или вакуум. Как показано далее в разделе 3.4, статическое

давление на поверхности канала в донной области позади цилиндра понижается до 4 кПа, что при температуре воды в экспериментах (25°C) очень близко к давлению насыщения (3,2 кПа), и привело бы к кипению жидкости в данной области. В данном случае наблюдалось вскипание редких капель воды на поверхности стекла. Сделано предположение, что высоконапорные кавитационные струи при данных параметрах течения жидкости замыкают донную область и препятствуют образованию обратных токов жидкости в сторону тела обтекания.

Более интенсивное формирование данного явления хорошо видно при обтекании одиночного тела с фиксированной точкой отрыва - пластины (рисунок 3.1), хотя данный эффект встречается при всех телах обтекания, компоновках и режимных вариантах работы волнового генератора.

При обтекании пластин, расположенных в два ряда, при переменном давлении на выходе из генератора первоначально кавитация появляется за вторым рядом тел, при значительно больших значениях перепада давления  $(P_{вх} - P_{вых})/P_{вх} = 0,64$ , чем при обтекании цилиндра, в связи с большим сопротивлением пластины и меньшей скоростью течения (рисунок 3.1). Дальнейшее увеличение перепада давления создает условие для формирования кавитационной пелены за первым телом, но наличие второго ряда тел приводит к уменьшению перепада давления на пластине и ограничению размера образующейся кавитационной пелены.

Уменьшение перепада давления при изменении давления на выходе приводит к тому, что в канале с телами обтекания – цилиндр и пластина, установленными в два ряда, реализуется безкавитационное течение жидкости при  $(P_{вх} - P_{вых})/P_{вх} = 0,45$  и  $0,64$ , соответственно, а для этих же тел, но установленных в один ряд – при  $(P_{вх} - P_{вых})/P_{вх} = 0,28$  и  $0,42$ .

Наличие насечки на поверхности круглого цилиндра приводит к турбулизации пограничного слоя на нем и к усилению образования кавитационной пелены, что выражается в увеличении ее размеров, которые видно по фотографиям, представленным на рисунке 3.1 [77,88]. Также турбулизация

пограничного слоя на поверхности цилиндра способствует некоторому уменьшению его сопротивления и началу формирования кавитации при несколько большем перепаде давления на генераторе  $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} = 0,5$ .



Цилиндр,  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} = 0,56$ ;  
 $Re = 2,03 \cdot 10^5$



Цилиндр,  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} = 0,62$ ;  
 $Re = 2,15 \cdot 10^5$



Пластина,  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} = 0,75$ ;  
 $Re = 1,63 \cdot 10^5$



Пластина,  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} = 0,68$ ;  
 $Re = 1,72 \cdot 10^5$



Цилиндр с  
насечкой,  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} = 0,64$ ;  
 $Re = 2,09 \cdot 10^5$



Серп,  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} = 0,74$ ;  
 $Re = 1,57 \cdot 10^5$



Стакан,  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} = 0,88$ ;  
 $Re = 1,75 \cdot 10^5$

Рис. 3.1. Фрагменты картин визуализации кавитационных зон в канале генератора с различными телами обтекания при  $P_{\text{вх}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{вых}} = \text{var}$

Начало образования кавитации за телами обтекания – серп и стакан происходит при одинаковых перепадах давления, однако, для стакана характерна большая скорость течения жидкости. Образование кавитационной пелены за данными телами достаточно похоже на кавитационные каверны в канале за поперечной пластиной.

Обтекание цилиндров и пластин, расположенных в два и один ряд, при переменном давлении на входе  $P_{вх}=var$  и постоянном противодавлении  $P_{вых}=const$  приведены на рисунке 3.2. Образование и развитие кавитационных каверн носит идентичный характер, но происходит при гораздо меньших перепадах давления на генераторе и, соответственно, скоростях течения жидкости в связи с постоянно низким давления позади тел обтекания.



Цилиндр,  
 $(P_{вх}-P_{вых})/P_{вх}=0,55;$   
 $Re=1,10\cdot 10^5$



Цилиндр,  
 $(P_{вх}-P_{вых})/P_{вх}=0,6;$   
 $Re=1,36\cdot 10^5$



Пластина,  
 $(P_{вх}-P_{вых})/P_{вх}=0,75;$   
 $Re=1,07\cdot 10^5$



Пластина,  
 $(P_{вх}-P_{вых})/P_{вх}=0,68;$   
 $Re=1,06\cdot 10^5$

Рис. 3.2. Фрагменты картин визуализации кавитационных зон в канале генератора с различными телами обтекания при  $P_{вх}=var$ ,  $P_{вых}=const$

Следует отметить, что для плохо обтекаемых тел: пластина, серп и стакан – размер кавитационной пелены в поперечном направлении превышает поперечный

размер этих тел и больше, чем размер вихревой пелены для тел обтекания: цилиндр.

Обобщение экспериментальных визуализационных картин кавитационных зон позади цилиндра и пластины в проточном волновом генераторе плоского типа, при различных режимных параметрах приведено на рисунке 3.3, где показана зависимость безразмерного параметра  $\lambda = l_k/d$  [88] от числа Рейнольдса  $Re$  и относительного перепада давления на генераторе  $(P_{вх}-P_{вых})/P_{вх}$ , где  $l_k$  – длина кавитационной пелены, с точкой отсчета от места ее образования,  $d$  – поперечный размер тел обтекания.

На графике видно, что длина кавитационной пелены меняется от начала зарождения до максимально видимой ( $\lambda \approx 14$ ) в небольшом диапазоне чисел Рейнольдса. Причем для режимов с переменным давлением на выходе  $P_{вых} = \text{var}$  заметное изменение скорости потока начинает происходить только в диапазоне  $\lambda = 0 \div 4$  ( $(P_{вх}-P_{вых})/P_{вх} = 0,27 \div 0,55$ ). При построении зависимости  $\lambda = f((P_{вх}-P_{вых})/P_{вх})$  полученные экспериментальные данные складываются практически в единые кривые, что характеризует данный параметр, как обобщающий для протекающих кавитационных явлений в проточном волновом генераторе.

Наличие дополнительного второго ряда тел в проточном генераторе способствует стабилизации размеров кавитационной пелены за первым телом, а также практически постоянному ее размеру в достаточно широком диапазоне гидродинамических параметров (рисунке 3.3), что позволяет при проектировании проточных волновых генераторов, варьируя компоновочные размеры проточной части, создавать автоматическую кавитационную область в рабочей зоне волнового генератора, обладающую определенными свойствами интенсивности кавитационного воздействия на обрабатываемую среду.

Данные результаты говорят об особенности обтекания тел различной формы потоком жидкости в узком профилированном канале и являются важным исходным материалом при проектировании и создании проточных генераторов, реализующих волновые кавитационные процессы.



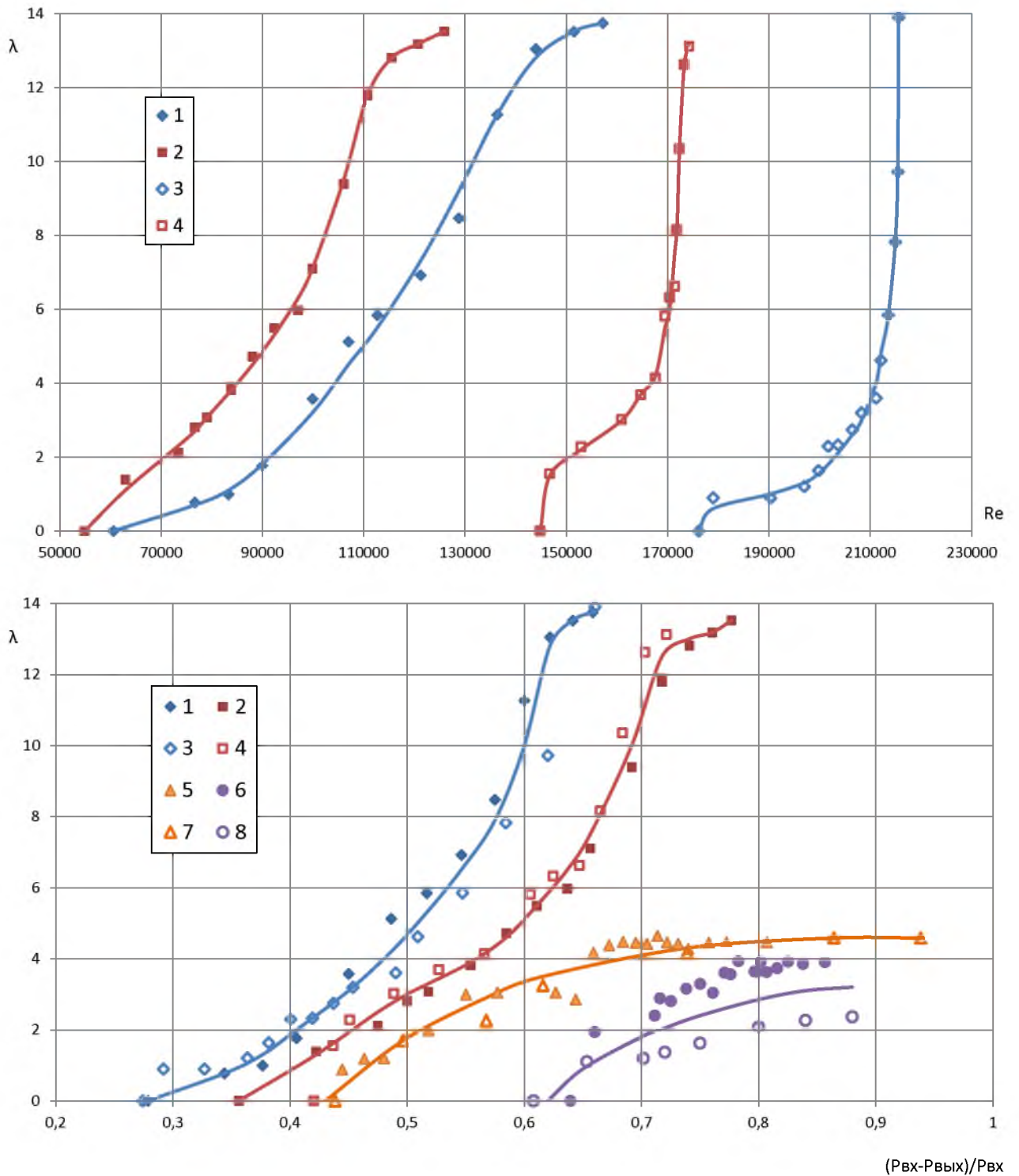


Рис.3.3. Зависимости относительной длины кавитационной зоны от числа

Рейнольдса и от  $(P_{vx} - P_{vyx})/P_{vx}$  для тел обтекания, установленных

в один ряд: 1 – цилиндр, 2 – пластина,  $P_{vx} = \text{var}$ ,  $P_{vyx} = \text{const}$ ;

3 – цилиндр, 4 – пластина,  $P_{vx} = \text{const}$ ,  $P_{vyx} = \text{var}$ ;

в два ряда: 5 – цилиндр, 6 – пластина,  $P_{vx} = \text{var}$ ,  $P_{vyx} = \text{const}$ ;

7 – цилиндр, 8 – пластина,  $P_{vx} = \text{const}$ ,  $P_{vyx} = \text{var}$ ;

### 3.2. Гидродинамические особенности течения жидкости в узком профилированном канале с различными телами обтекания

Течение жидкости в узкой входной части канала волнового смесителя исследовалось для характерных диапазонов промышленных аппаратов при скоростях набегающего потока до  $V_{\text{вх}} \approx 22$  м/с ( $Re = 2,2 \cdot 10^5$ ) и давлений до 1,1 МПа. При таких режимах течения за телами обтекания, как показали эксперименты, образуются срывные вихревые потоки и зоны пониженного давления, которые приводят к разрыву среды и образованию кавитационных явлений. В результате в экспериментах с различными телами обтекания при неизменном входном давлении  $P_{\text{вх}}$  и изменении  $P_{\text{вых}}$  было установлено, что расход жидкости в начале практически не меняется при соотношении  $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} \geq 0,6$  (рисунок 3.4). Особенно это характерно для генератора с телами обтекания: цилиндр, цилиндр с насечкой и стакан – в диапазоне  $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} = 0,6 - 0,87$ . С телами обтекания: пластина, серп – этот диапазон короче и составляет  $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} = 0,75 - 0,87$ . При дальнейшем увеличении  $P_{\text{вых}}$  расход жидкости быстро убывает. Кроме того, из рисунка 3.4 следует, что установка в генератор тел обтекания: пластина, серп, стакан – приводит к потере расхода жидкости на 20-30% больше по сравнению с телами обтекания: цилиндр и цилиндр с насечкой.

Эффект постоянства расхода жидкости через волновой генератор при больших перепадах давления на нем происходит в результате образования обширных кавитационных областей, которые при малом противодавлении занимают практически все проходное сечение канала и, тем самым, создают дополнительное гидравлическое сопротивление канала. Увеличение давления на выходе из волнового генератора перекрытием выходного вентиля приводило к уменьшению кавитационной области. Дальнейшее падение расхода происходит уже при отсутствии кавитации.

Таким образом, при исследуемых параметрах работы волнового генератора с формированием кавитационных волновых эффектов, течение жидкости происходит практически при неизменном расходе, а объем кавитации и

интенсивность кавитационных явлений зависит от перепада давления на генераторе.

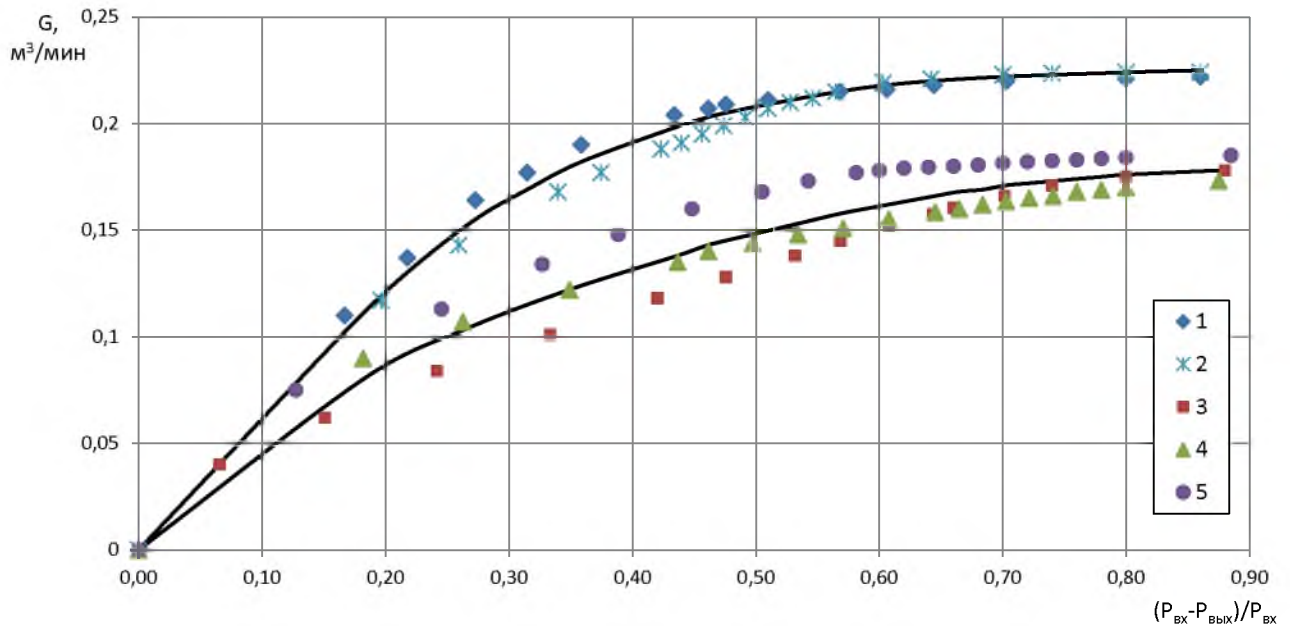


Рис. 3.4. Зависимости  $G=f((P_{вх}-P_{вых})/P_{вх})$  для различных тел обтекания, установленных в 2 ряда при  $P_{вх}=\text{const}$ ,  $P_{вых}=\text{var}$

1 – гладкий цилиндр; 2 – цилиндр с насечкой; 3 – пластина; 4 – серп; 5 – стакан

### 3.3. Исследование влияния гидродинамических параметров течения жидкости на интенсивность кавитационной эрозии

Обтекание тел потоком жидкости при определенных гидродинамических и теплофизических параметрах, приводящих к разрыву среды и образованию кавитационной пелены, состоящей из парогазовых пузырьков, создают внутри них при схлопывании давление среды до 100МПа, а температуры 10 000°C [17]. Время схлопывания пузырька составляет микросекунды. Уиллер получил данные [89], что при схлопывании пузырька вблизи поверхности температура материала повышается на 500-800 °С. Гаррисон также установил [90], что в жидкости вокруг пузырька могут возникать высокие перепады давления (до 4000 атм) вследствие ударных волн при схлопывание кавитационного пузырька. При гидродинамической кавитации и присутствия множества пузырьков, кавитационный пузырек всегда схлопывается несимметрично, при этом

образуются кумулятивные струйки, которые как раз вызывают эрозию и разрушение материалов [91]. Однако установлено, что кавитационный пузырек должен находиться непосредственно на поверхности материала, а сила его разрушающего воздействия практически становится равна нулю на расстоянии одного диаметра от поверхности [92].

Фотографии контрольных образцов, установленных за первыми телами обтекания, показали, что на их поверхности образуются зоны, характерные для кавитационного уноса материала при схлопывании на их поверхности газовых пузырьков [16]. Эти зоны располагаются симметрично относительно оси генератора и тел обтекания там, где свечение от кавитационных пелен снижается за счет уменьшения концентрации газовых пузырьков при их схлопывании, что хорошо коррелируется с полученными картинками течения потока в разделе 3.1. Примеры фотографий следов максимальной кавитационной эрозии на контрольной свинцовой вставке для различных тел обтекания представлены на рисунке 3.5.

По результатам проведенных экспериментов были построены зависимости относительного уноса  $\Delta m/M$  (%) от относительного перепада давления на генераторе  $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}$  при  $P_{\text{вх}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{вых}} = \text{var}$  и приведены на рисунке 3.6, где  $\Delta m$  – унос массы свинца с контрольного образца за 1 час работы,  $M$  – масса исходной свинцовой вставки, рассчитанная по объему свинцовой контрольной вставки и его плотности при нормальных условиях

Зависимости  $\Delta m/M = f((P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}})$  имеют характерный максимум для всех исследуемых тел обтекания. Иначе говоря, интенсивность кавитации за телами обтекания в плоском генераторе с ростом  $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}$  вначале увеличивается, затем при определенных параметрах  $P_{\text{вых}}$  уменьшается. Это связано первоначально с влиянием перепада давления на скорость потока и размеры кавитационной пелены за первым и вторым рядом тел обтекания, а далее с уровнем статического давления в месте установки контрольной вставки и интенсивности схлопывания парогазовых пузырьков.



2 ряда цилиндров  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) / P_{\text{вх}} = 0,56;$   
 $Re = 2,03 \cdot 10^5;$   
 $\Delta m / M \cdot 100 = 0,65\%$



1 ряд цилиндров  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) / P_{\text{вх}} = 0,45;$   
 $Re = 2,08 \cdot 10^5;$   
 $\Delta m / M \cdot 100 = 1,31\%$



2 ряда пластин  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) / P_{\text{вх}} = 0,75;$   
 $Re = 1,63 \cdot 10^5;$   
 $\Delta m / M \cdot 100 = 1,74\%$



1 ряд пластин  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) / P_{\text{вх}} = 0,52;$   
 $Re = 1,65 \cdot 10^5;$   
 $\Delta m / M \cdot 100 = 1,37\%$



2 ряда цилиндров с насечкой  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) / P_{\text{вх}} = 0,62;$   
 $Re = 2,08 \cdot 10^5;$   
 $\Delta m / M \cdot 100 = 1,73\%$



1 ряд цилиндров с насечкой  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) / P_{\text{вх}} = 0,46;$   
 $Re = 2,15 \cdot 10^5;$   
 $\Delta m / M \cdot 100 = 1,87\%$



2 ряда серпов  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) / P_{\text{вх}} = 0,74;$   
 $Re = 1,57 \cdot 10^5;$   
 $\Delta m / M \cdot 100 = 1,48\%$



2 ряда стаканов  
 $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}) / P_{\text{вх}} = 0,88;$   
 $Re = 1,75 \cdot 10^5;$   
 $\Delta m / M \cdot 100 = 0,41\%$

Рис.3.5. Фотографии следов кавитационной эрозии на контрольном образце для различных тел обтекания при максимальном уносе и  $P_{\text{вх}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{вых}} = \text{var}$



Отсутствие экстремума для тела обтекания – стакан, объясняется сдвигом начала отрыва потока на расстояние в 1 калибр к входу канала и, тем самым, расположением большей части зоны эрозии между телом и контрольной вставкой.

Несмотря на локальный характер расположения зон с интенсивной кавитацией, по данным, приведенным на рисунке 3.6, можно заключить, что наиболее высокая интенсивность кавитации реализуется в генераторе с телами обтекания: цилиндр с насечкой и пластина, установленным в два и один ряд. Далее идут генераторы с телами обтекания: серп, цилиндр, стакан.

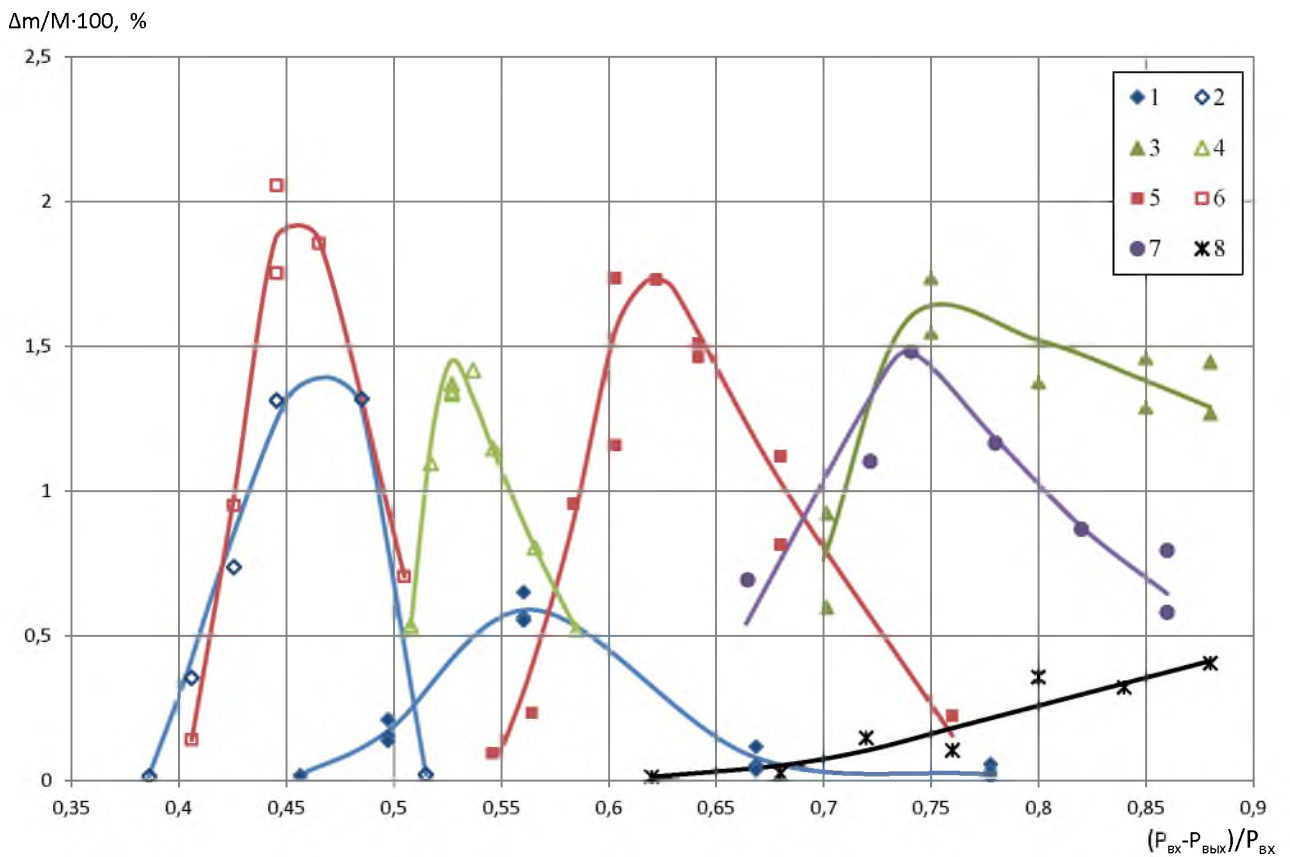


Рис. 3.6. Зависимости  $\Delta m/M \cdot 100 = f((P_{вх} - P_{вых})/P_{вх})$  для различных тел обтекания (рабочая жидкость – вода)

- 1 – 2 ряда цилиндров; 2 – 1 ряд цилиндров; 3 – 2 ряда пластин; 4 – 1 ряд пластин;  
 5 – 2 ряда цилиндров с насечкой; 6 – 1 ряд цилиндров с насечкой; 7 – 2 ряда серпов; 8 – 2 ряда стаканов

Резкое увеличение интенсивности кавитации за телом обтекания – цилиндр с насечкой связано с увеличением турбулентности потока на поверхности цилиндра и свидетельствует о существенном влиянии волновых полей на

кавитационные процессы [77,88]. Поэтому сделано предположение, что дальнейшее увеличение турбулентности всего потока в целом приведет к дополнительной интенсификации кавитационных процессов. Этот факт будет экспериментально проверен на модернизированной модели канала проточного волнового генератора плоского типа, представленный в разделе 3.6.

Возникновение и прекращение кавитации с телами обтекания: пластина, серп, стакан – происходит при расходах жидкости и величинах противодавления на 25–30% меньших, чем для тел обтекания: цилиндр и цилиндр с насечкой – что связано с большим гидравлическим сопротивлением этих тел, характером обтекания и наличием фиксированной точки отрыва потока.

Для тела обтекания – стакан область схлопывания газовых пузырьков при  $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}} = 0,88$  находится на максимальном расстоянии от тела обтекания и только частично на контрольном образце. Происходит это из-за геометрии тела обтекания и смещения точки отрыва потока с передней кромки на 1 калибр к входу в генератор. При уменьшении  $(P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}$  она приближается к телу обтекания, сходит с контрольной вставки и величина  $\Delta m/M$  снижается. Этим объясняется отсутствие на зависимости  $\Delta m/M \cdot 100 = f((P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}})$  для этого тела обтекания характерного максимума и небольшая величина  $\Delta m/M$  по сравнению с другими телами обтекания.

Следует отметить, что приведенные на рисунке 3.6 данные по эффективности кавитации свидетельствуют о процессах, протекающих на площади, ограниченной размером контрольного образца, хотя получены данные по уносу на увеличенной контрольной вставке, результаты которых коррелируют с выше приведенными.

При обтекании одиночных тел наблюдается повышение интенсивности схлопывания пузырьков для тел обтекания: цилиндр и цилиндр с насечкой, а для одиночной пластины наоборот – понижение. Совместно с этим максимальный унос с контрольной вставки за одиночными телами происходит при меньших перепадах давления на генераторе.

### 3.4. Анализ нестационарных волновых явлений в следе за телами обтекания различной формы

Измерение пульсаций давления проводилось в точке с координатами:  $H^*=0$ ,  $L^*=3,15$  – в центре контрольной вставки и  $H^*=0$ ,  $L^*=13,65$  – за вторым рядом тел. Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) пульсаций давления показали, что в этом месте на определенных режимах возникают пики давления, связанные с нестационарным характером отрыва потока с тел обтекания [55].

Для определения фоновой составляющей пульсаций давления в канале генератора от насоса и подводящих труб проведены испытания генератора без тел обтекания. Эксперименты показали, что оба датчика регистрируют пульсации давления в потоке жидкости в генераторе при частоте  $f \geq 0,05$  кГц с небольшой постоянной амплитудой. Эти данные свидетельствуют о том, что в плоском генераторе без тел обтекания отсутствуют посторонние возмущения потока и резонансные колебания в широком диапазоне гидродинамических параметров работы, за исключением возмущения от насоса на низкой частоте и низкоамплитудных турбулентных пульсаций.

Примеры зафиксированных колебаний давления, возникающих в донной области позади различных тел обтекания, приведены на рисунках 3.7-3.9. Единица масштаба на графиках приведена в Вольтах. Верхняя кривая на графиках является характеристикой колебания давления во времени. Нижняя – математическая обработка временной характеристики согласно быстрому Фурье - преобразованию за 5 секунд временной выборки и представляет собой амплитудно-частотную характеристику. Пределы графиков по оси ординат имеют разные масштабы для лучшего отображения полученных величин пульсаций давления.

Амплитудно-частотные характеристики для различных тел обтекания, установленных как в два ряда, так и в один, отображают характерные колебания давления, возникающие в результате нестационарного отрыва потока за телами обтекания с плавающей точкой отрыва для цилиндра и с фиксированной точкой с острой кромки пластины, что необходимо учитывать при выборе конструктивной



схемы проточного волнового генератора в зависимости от цели его использования.

На рисунке 3.7 приведены АЧХ, соответствующие обтеканию тел при переменном давлении на выходе из генератора. Для цилиндров, установленных в два ряда и в один, наблюдается появление пика давления на частоте  $f=1,4$  кГц ( $(P_{\text{вх}}-P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}=0,51$ ) и  $f=1,44$  кГц ( $(P_{\text{вх}}-P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}=0,42$ ), соответственно. Изменение относительного перепада давления на генераторе  $(P_{\text{вх}}-P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}$  в обе стороны от этих значений приводит к значительному уменьшению амплитуды колебаний. Такая же закономерность наблюдается при обтекании пластины, установленной в один ряд в плоский генератор, при этом максимальный пик давления находится на режиме работы генератора  $(P_{\text{вх}}-P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}=0,49$  и  $f=1,24$  кГц, тогда как обтекание двух рядов пластин способствует появлению пиков давления во всем диапазоне наличия кавитации, хотя отмечается также режим максимальной амплитуды колебаний давления с частотой 1,2 кГц и  $(P_{\text{вх}}-P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}=0,75$ .

Стоит отметить, что при обтекании одиночных тел максимальный пик колебания давления возникает при меньших перепадах на волновом генераторе и имеет максимальную амплитуду в 1,2-1,3 раза больше, чем при обтекании двух рядов тел.

По полученным АЧХ видно (верхний спектр), что существуют режимы работы волнового генератора, за телами обтекания которого датчик фиксирует локальные колебания давления во времени, достигающие 4 МПа, что свидетельствует высокой мощности процессов, протекающих в генераторах такого типа.

Организация насечек на цилиндре приводит к увеличению амплитуды колебания в 1,2-1,3 раза по сравнению с гладким цилиндром и находится на уровне одиночных тел обтекания. При этом частотная характеристика колебания давления качественно не меняется (рисунок 3.7).

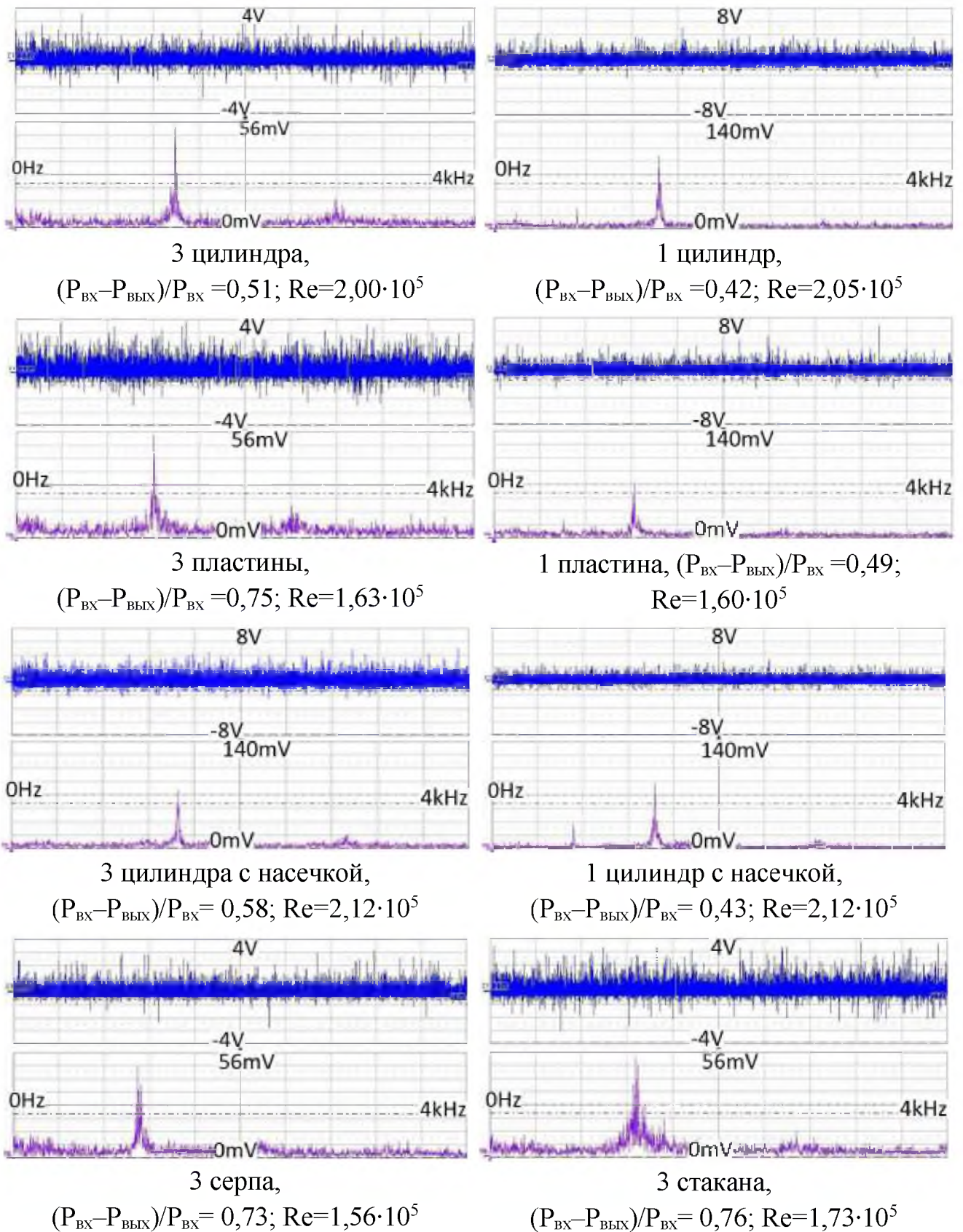


Рис. 3.7. Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления за телами обтекания различной формы при  $P_{BX}=\text{const}$ ,  $P_{BYX}=\text{var}$

При установке в генератор тела обтекания – серп, пик давления возникает на меньшей частоте  $f=1,1$  кГц и  $((P_{BX}-P_{BYX})/P_{BX}=0,73)$ , причем максимальная его

амплитуда сравнима с аналогичной для тел обтекания цилиндр и пластина, установленных в два ряда (рисунок 3.7). Установка тел обтекания стакан приводит к появлению комплекса острых пиков давления в диапазоне частот  $f=1,2-1,3$  кГц, достигая максимума при  $((P_{\text{вх}}-P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}=0,76)$ , а величина его также сравнима с аналогичными для других тел обтекания.

Изменение входного давления  $P_{\text{вх}}=\text{var}$  при постоянном  $P_{\text{вых}}=\text{const}$  приводит к похожей картине формирования колебательных явлений за телами обтекания – цилиндр и пластина, расположенными в два ряда (рисунок 3.8). При этом из-за меньшей потенциальной энергии потока колебания давления имеют меньшую амплитуду, но также существует характерный пик давления на частоте  $f=0,7$  кГц  $((P_{\text{вх}}-P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}=0,55)$  для цилиндра и  $f=0,84$  кГц  $((P_{\text{вх}}-P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}=0,78)$  для пластины.

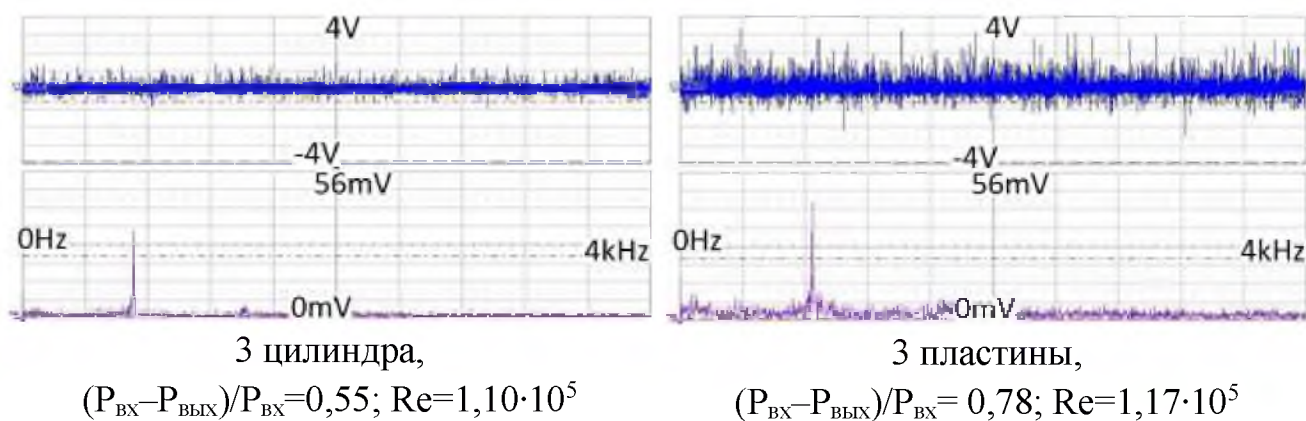


Рис. 3.8. Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления за телами обтекания, расположенными в два ряда при  $P_{\text{вх}}=\text{var}$ ,  $P_{\text{вых}}=\text{const}$

Сопоставление полученных АЧХ с картинками визуализации, показало, что с увеличением  $(P_{\text{вх}}-P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}$  происходит ослабление амплитуды колебаний вследствие попадания датчика давления за первым рядом тел в донную кавитационную область, насыщенную парогазовыми пузырьками, которые гасят возникающие колебания. Опытным путем установлено, что второй датчик на расстоянии  $L^*=13,65$  от первого ряда тел фиксирует колебания давления на одинаковых частотах с первым при максимальной их амплитуде и также фиксирует убывание амплитуды колебаний при больших значениях  $(P_{\text{вх}}-P_{\text{вых}})/P_{\text{вх}}$ , когда кавитационная пелена заполняет все сечение экспериментального канала, что показано на рисунке 3.9.

1 цилиндр

1 пластина



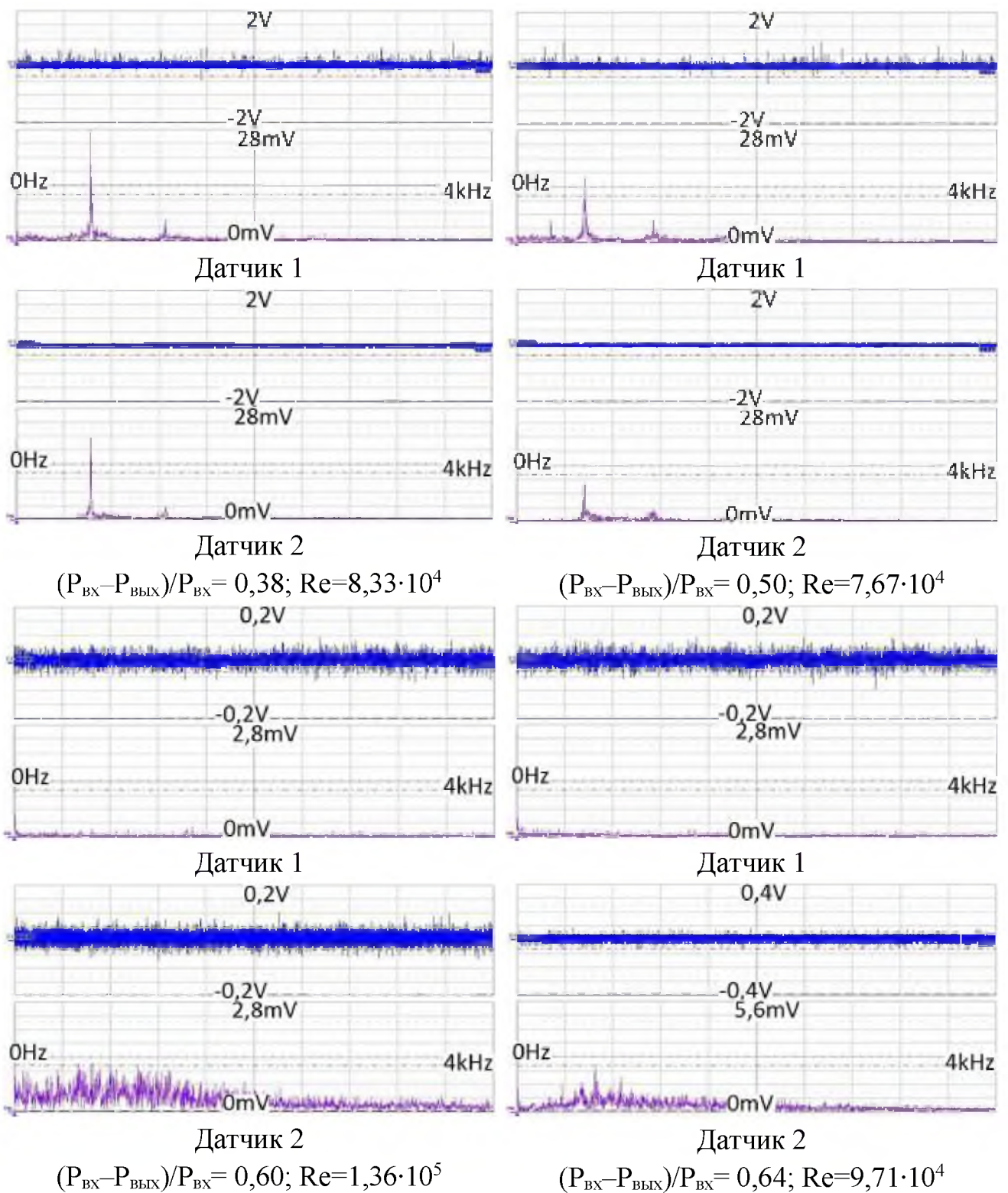


Рис. 3.9. Амплитудно-частотные характеристики пульсаций давления за телами обтекания – цилиндр и пластина, расположенных в один ряд при

$$P_{\text{ВХ}} = \text{var}, P_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$$

Для обобщения полученных результатов по нестационарным явлениям, возникающим при обтекании жидкостью тел различной формы, была построена зависимость частоты возникновения пиков колебаний давления ( $f$ ) от числа

Рейнольдса  $Re$ , приведенная на рисунке 3.10. Зависимость имеет линейный характер в исследуемом диапазоне ( $Re=8 \cdot 10^3 \div 2.2 \cdot 10^5$ ) и описывается следующим выражением:

$$f=0,0068 \cdot Re \quad (3.1)$$

Число Струхалиа  $Sh$  для чисел  $Re$ , реализуемых в экспериментах, постоянно и равно  $Sh = \frac{f/2 \cdot d}{v} = \frac{0,0068 \cdot Re \cdot d}{2 \cdot v} = 0,34$ . Уменьшение частоты в 2 раза, объясняется тем, что датчик фиксировал колебания давления в донной области от каждого периодически образующегося вихря с двух сторон тел обтекания. Полученное значение числа Струхалиа близко к рассчитанному по формуле Акылбаева (1.2) для параметра загроможденности исследуемого канала волнового генератора, которое равно  $Sh^*=0,31$  [69].

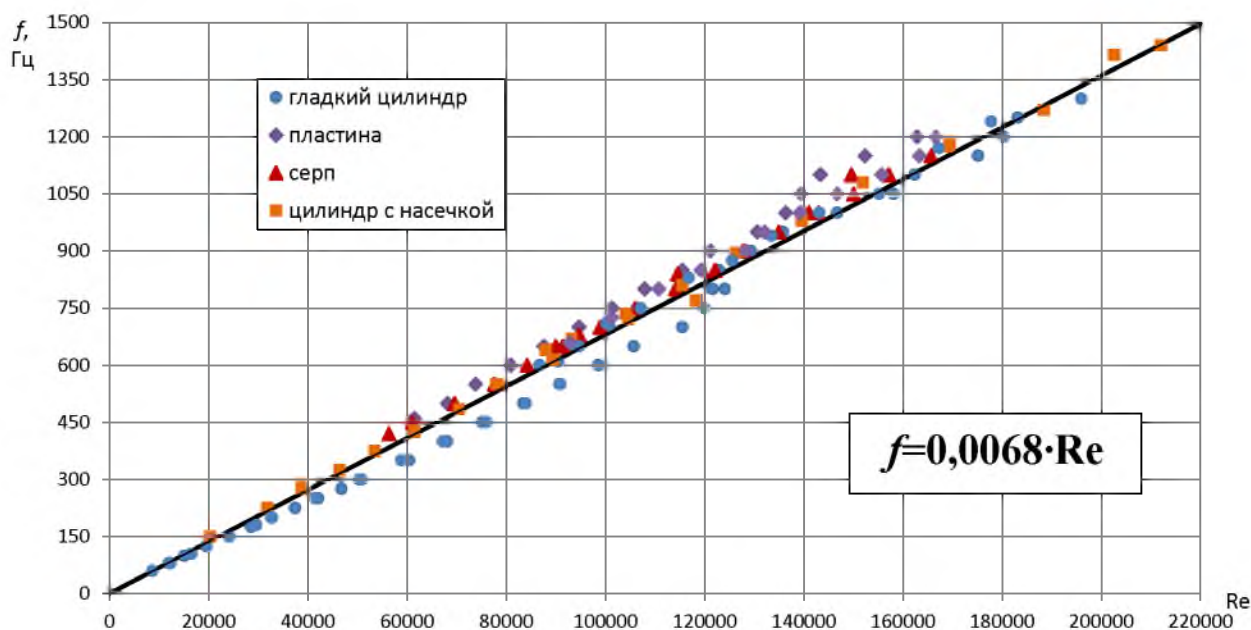


Рис. 3.10. Зависимость  $f=f(Re)$  для различных тел обтекания

Стоит отметить особенности возникновения пиков давления в жидкости позади тел обтекания. Колебания давления высокой амплитуды на всех телах обтекания возникали только при наличии разрыва среды и кавитации. При обтекании цилиндра даже при безкавитационном течении фиксировались пики АЧХ, отличающиеся от шумовых турбулентных пульсаций. Тогда как для тел обтекания с фиксированной точкой отрыва: пластина, серп, стакан - при  $Re \leq 6 \cdot 10^4$  подобных всплесков давления не наблюдалось. Данное положение следует

учитывать как определяющий диапазон режимов работы волнового проточного генератора плоского для приготовления продукта из исходных компонентов сырья.

### 3.5. Исследование полей статического давления за телами обтекания различной формы

Обтекание тел различной формы при высоких числах Рейнольдса набегающего потока сопряжено с образованием отрывных зон, областей пониженного давления и обратных токов в донной области позади тела. Как отмечалось в Главе 1, на величину среднего статического давления за телом обтекания влияют такие факторы, как степень турбулентности набегающего потока и коэффициент загроможденности. Знание полей распределения статического давления в следе за телами обтекания различной формы в плоском профилированном канале полезно для уточнения математических моделей обтекания тел различной формы в плоских узких каналах.

Измерения среднего статического давления проводились в точках на оси канала ( $H^*=0$ ) с координатами  $L^*=1,8; 2,3; 2,85; 3,45; 4; 4,5$ ; а для тела обтекания стакан еще и на  $L^*=5; 5,5$ .

Зависимости  $P=f(P_{\text{ВЫХ}})$  тел обтекания гладкий цилиндр и пластина, расположенных в один и два ряда, представлены на рисунках 3.11-3.12 и имеют нелинейный характер. При малых значениях  $P_{\text{ВЫХ}}$ , величина статического давления за телом обтекания  $P$  практически не зависит от противодействия, что отчетливо видно для случая одиночного тела (кривые 4,5,6). С увеличением  $P_{\text{ВЫХ}}$  размеры образующихся за телом кавитационных областей сокращаются. При этом гидравлическое сопротивление генератора падает, что компенсирует снижение расхода за счет уменьшения перепада давления на генераторе  $\Delta P = P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}}$ . В конечном счете, все это приводит к тому, что расход жидкости и, соответственно, скорость потока на входе в генератор остаются постоянными. При дальнейшем увеличении  $P_{\text{ВЫХ}}$ , когда размеры кавитационных областей не оказывают заметного влияния на гидравлическое сопротивление генератора, скорость потока за счет снижения  $\Delta P$  уменьшается, и давление на стенке канала за первыми телами

плавно растет, стремясь к значению  $P=P_{\text{вх}}=P_{\text{вых}}$ . Этот эффект встречался ранее в трубках «Вентури» [93, 94].

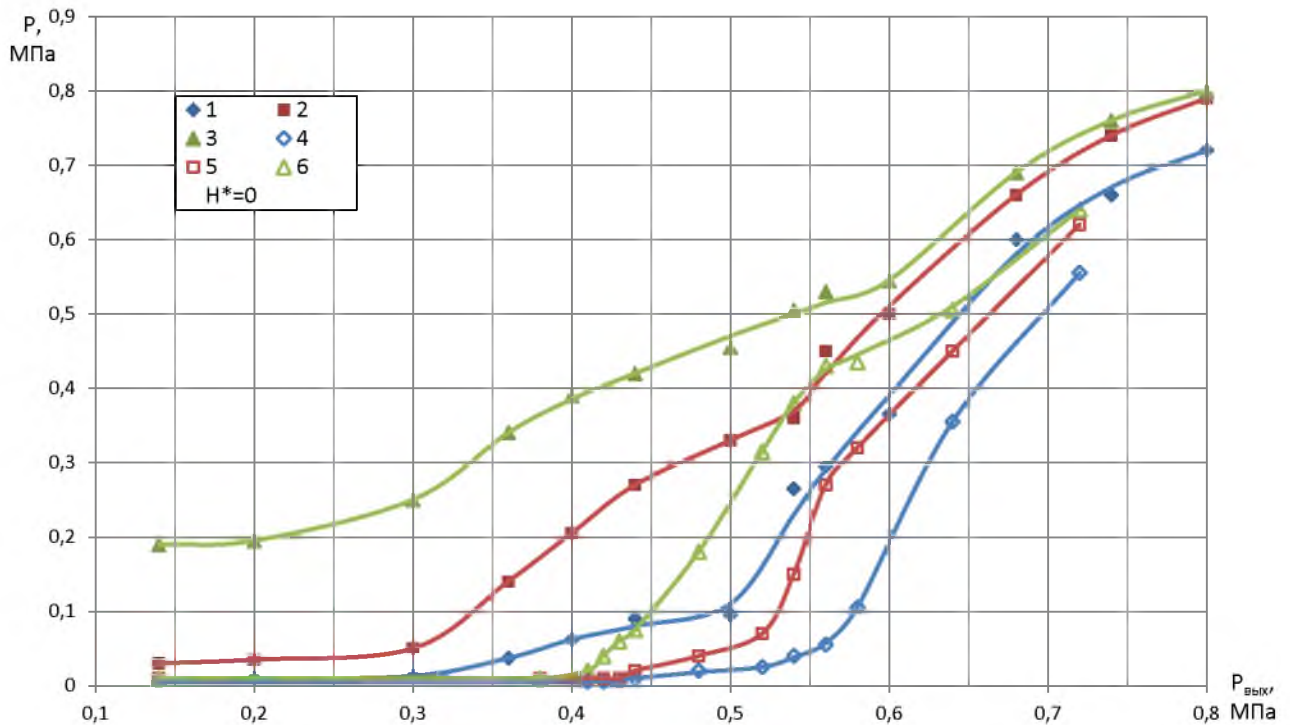


Рис. 3.11. Зависимости давления в следе за цилиндром при  $P_{\text{вх}}=\text{const}$ ,  $P_{\text{вых}}=\text{var}$  для двух рядов тел: 1 –  $L^*=1,8$ ; 2 –  $L^*=2,85$ ; 3 –  $L^*=4,5$ ; и одного ряда тел: 4 –  $L^*=1,8$ ; 5 –  $L^*=2,85$ ; 6 –  $L^*=4,5$

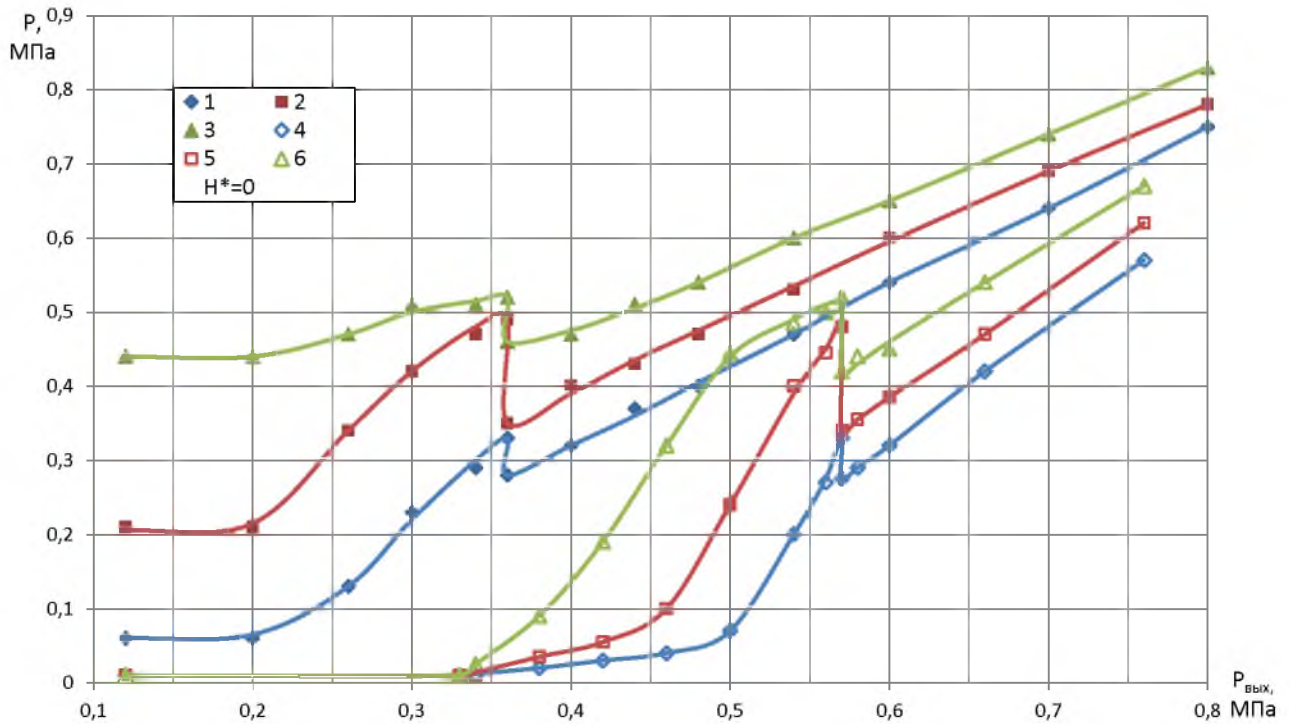


Рис. 3.12. Зависимости давления в следе за пластиной при  $P_{\text{вх}}=\text{const}$ ,  $P_{\text{вых}}=\text{var}$  для двух рядов тел: 1 –  $L^*=1,8$ ; 2 –  $L^*=2,85$ ; 3 –  $L^*=4,5$ ; и одного ряда тел: 4 –  $L^*=1,8$ ; 5 –  $L^*=2,85$ ; 6 –  $L^*=4,5$

Как видно из приведенных выше графиков, зависимости качественно похожи, т.е. значения статического давления за тело обтекания  $P$  увеличиваются с увеличением давления на выходе из генератора  $P_{\text{ВЫХ}}$ . Однако, хорошо заметны локальные изменения давления для обеих конфигураций с телом обтекания – цилиндр при  $P_{\text{ВЫХ}}=0,5-0,6$  и пластина при  $P_{\text{ВЫХ}}=0,36$  и  $0,57$ . Связано это, по-видимому, с тем, что скорость потока при данных перепадах давления достигает значения, при котором происходит перестройка течения за телами, происходит размыкание отрывных струй с образованием открытой донной области и обратных токов в ней, а также с формированием кавитационных зон, которые приводят к повышению давления за цилиндром, и к резкому понижению статического давления за пластиной.

Данное явление при обтекании пластины происходит из-за наличия фиксированной точки отрыва, и резкого разворота потока к оси канала при обтекании тела жидкостью, при этом замыкание донной области происходит до точек измерения давления, что отражается в резком повышении статического давления в результате схлопывания кавитационных пузырьков. За цилиндром же ввиду меньшего гидравлического сопротивления и большей скорости течения отрывные струи движутся параллельно оси канала дальше и смыкание происходит за областью измерения давления, то есть все точки расположены в области обратных токов и пониженного давления.

Из полученных зависимостей видно, что в диапазоне режимов работы волнового генератора есть такие режимы его работы, связанные с высоким перепадом давления, при которых наблюдалось сильное разряжение в следе за телом обтекания, величина которого достигала  $P=-0,096$  МПа, а значение низкого статического давления имеет больший диапазон по перепаду давления при обтекании цилиндра из-за меньшего его сопротивления и поэтому более длинного участка кавитационной пелены.



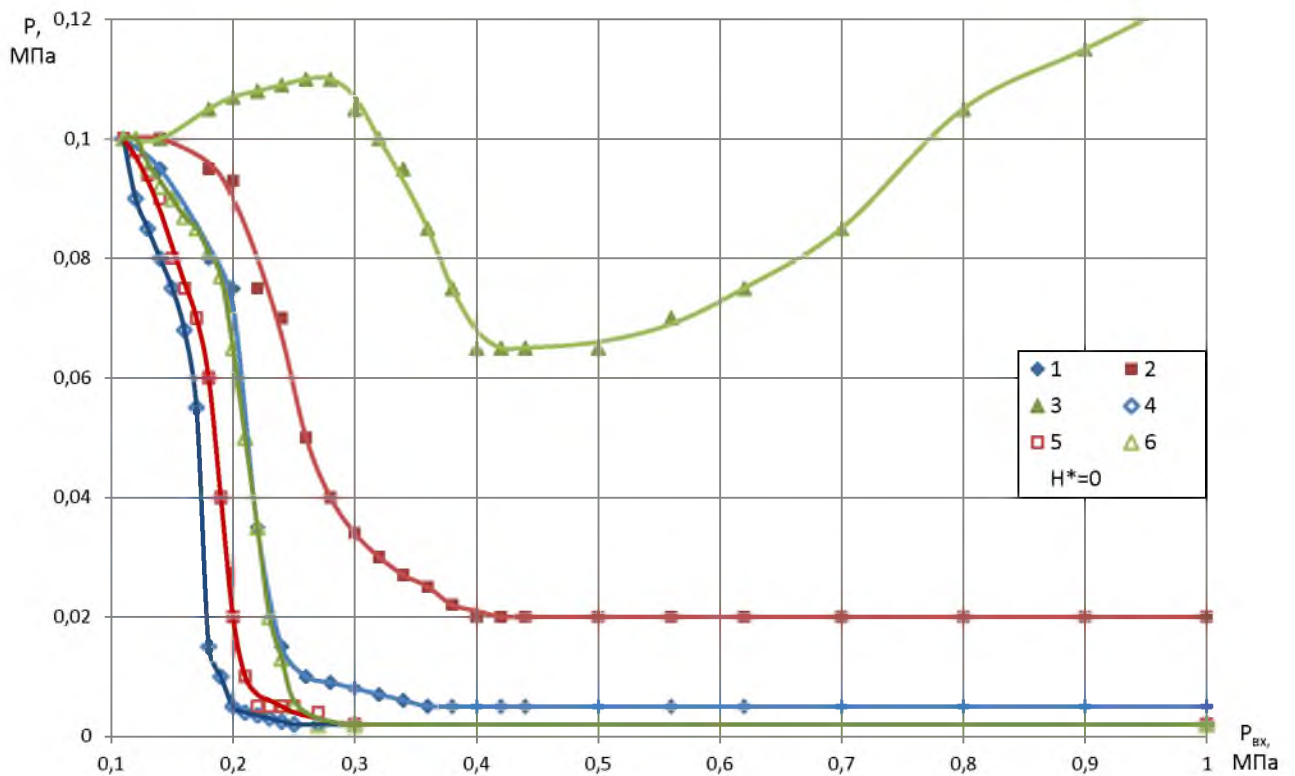


Рис. 3.13. Зависимости давления в следе за цилиндром при  $P_{вх} = \text{var}$ ,  $P_{ввых} = \text{const}$  для двух рядов тел: 1 –  $L^* = 1,8$ ; 2 –  $L^* = 2,85$ ; 3 –  $L^* = 4,5$ ; и одного ряда тел: 4 –  $L^* = 1,8$ ; 5 –  $L^* = 2,85$ ; 6 –  $L^* = 4,5$

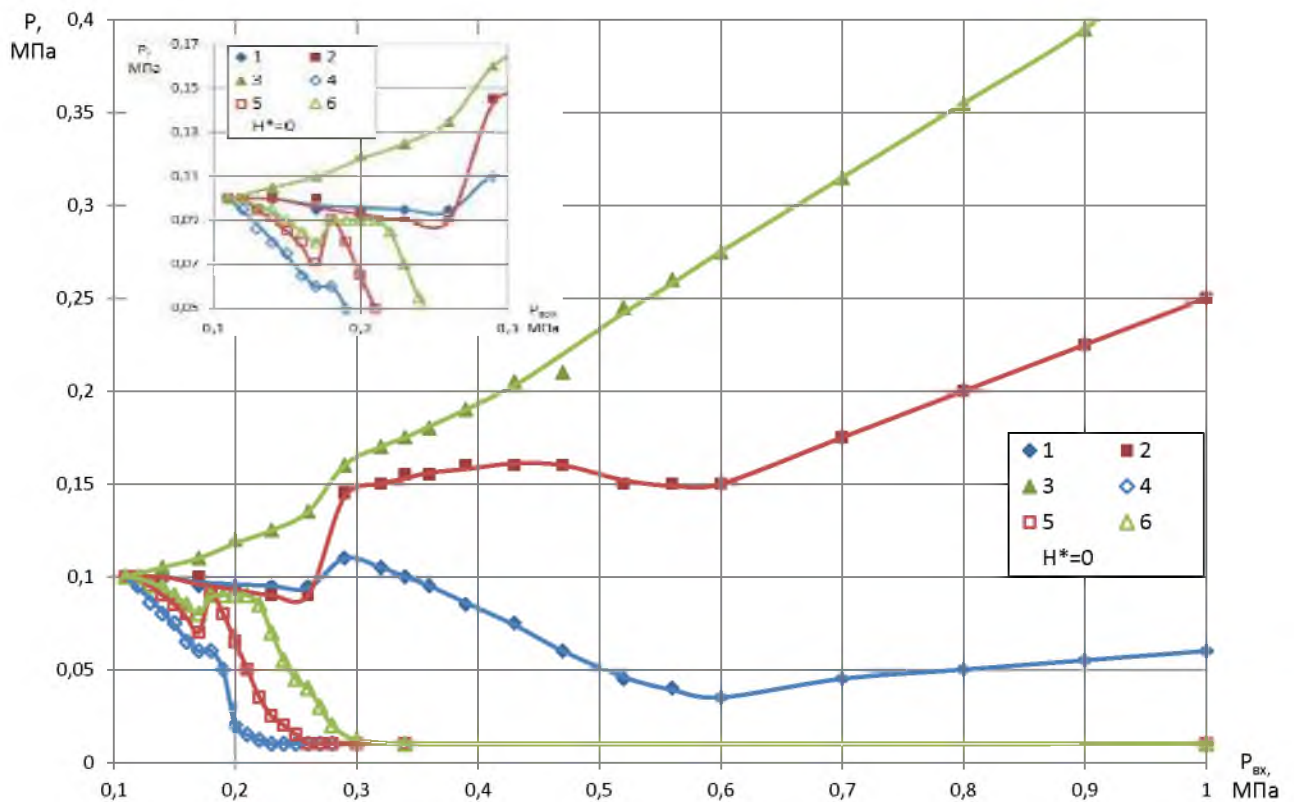


Рис. 3.14. Зависимости давления в следе за пластиной при  $P_{вх} = \text{var}$ ,  $P_{ввых} = \text{const}$  для двух рядов тел: 1 –  $L^* = 1,8$ ; 2 –  $L^* = 2,85$ ; 3 –  $L^* = 4,5$ ; и одного ряда тел: 4 –  $L^* = 1,8$ ; 5 –  $L^* = 2,85$ ; 6 –  $L^* = 4,5$

Измерение статического давления также проводилось при изменении входного давления  $P_{вх}$  от 0,12 до 1,0 МПа с постоянным давлением на выходе из генератора  $P_{вых} = \text{const}$  для тел обтекания – цилиндр и пластина, расположенных в один и два ряда, графики зависимостей которых приведены на рисунках 3.13-3.14, из которых следует, что уровень давления на выходе из генератора существенно влияет на распространение кавитационной пелены, которая в свою очередь является областью отрицательного давления. При данных режимах минимальное статическое давление в донной области достигается уже при  $P_{вх} = 0,27-0,30$  МПа для обоих тел.

Дополнительное гидравлическое сопротивление второго ряда тел создает повышенное статическое давление в камере между рядами, что оказывает влияние на распространение кавитационной пелены. Видно, что для цилиндра и пластины расположенных в 2 ряда, статическое давление растет вместе с перепадом давления на расстоянии  $L^* = 4,5$ , а для пластины еще ближе к телу, вплоть до  $L^* = 1,8$ , что говорит о более короткой донной кавитационной области этого тела.

При обтекании пластины при постоянном давлении на выходе из генератора также наблюдался скачек статического давления при начале образования кавитационной области, но величина этого повышения меньше чем при постоянном входном давлении из-за меньшего напора и уровня статического давления за телом обтекания.

Изменение статического давления за телами обтекания: цилиндр с насечкой, серп, стакан – похожи на выше описанные характеристики и имеют также область постоянного давления при низких значениях давления на выходе из генератора  $P_{вых}$  (рисунках 3.15-3.17). Наличие острых кромок для формирования отрыва потока с тел обтекания: серп и стакан – не приводило к резким локальным изменениям статического давления позади них, характерных для обтекания пластины.

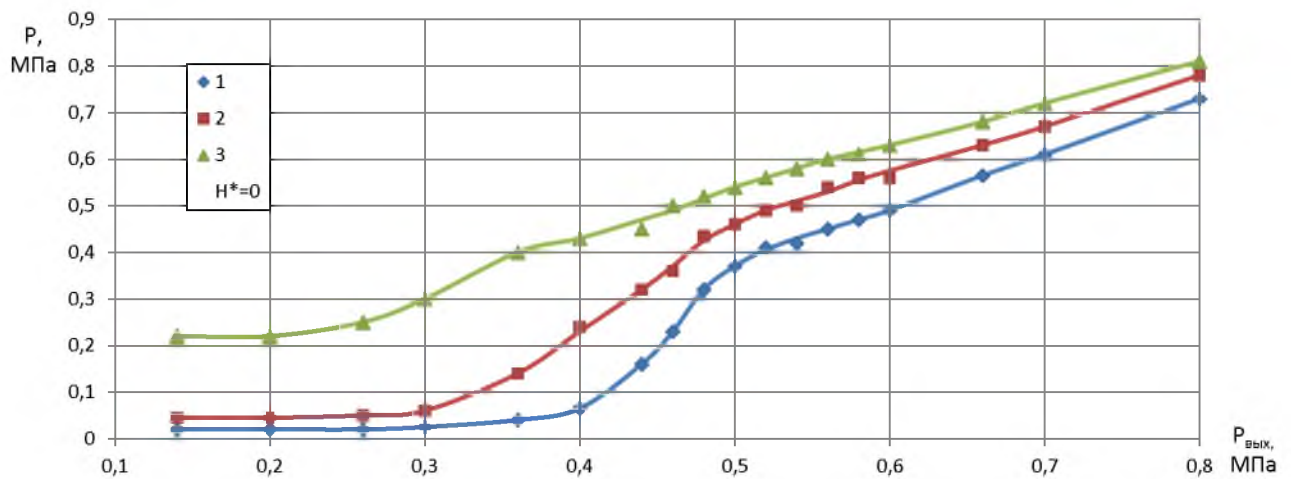


Рис. 3.15. Зависимости давления в следе за цилиндром с насечкой при  $P_{\text{вх}}=\text{const}$ ,  $P_{\text{вых}}=\text{var}$  для двух рядов тел: 1 –  $L^*=1,8$ ; 2 –  $L^*=2,85$ ; 3 –  $L^*=4,5$

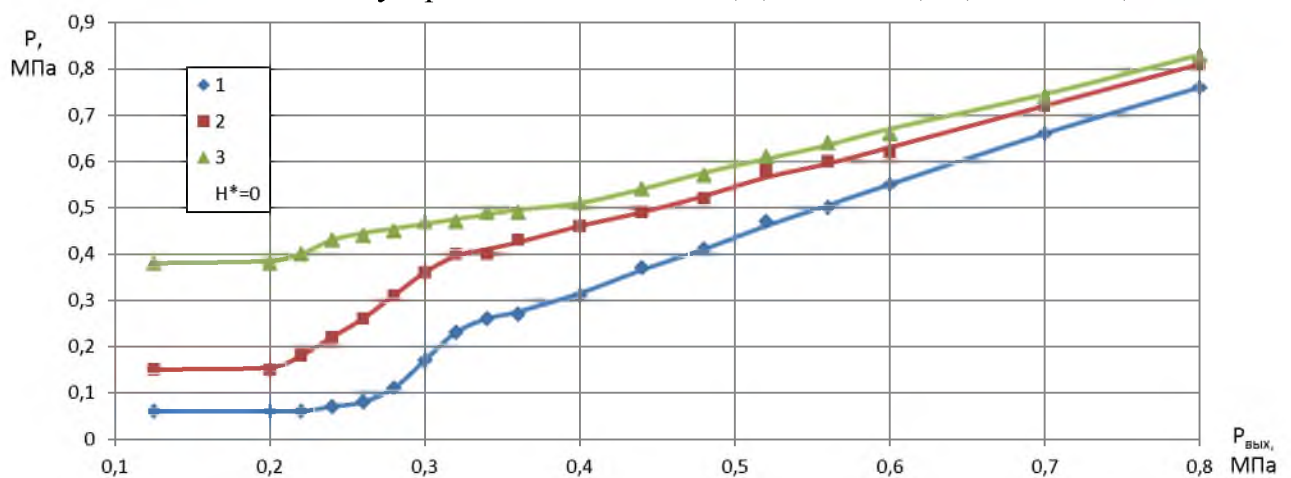


Рис. 3.16. Зависимости давления в следе за серпом при  $P_{\text{вх}}=\text{const}$ ,  $P_{\text{вых}}=\text{var}$  для двух рядов тел: 1 –  $L^*=1,8$ ; 2 –  $L^*=2,85$ ; 3 –  $L^*=4,5$

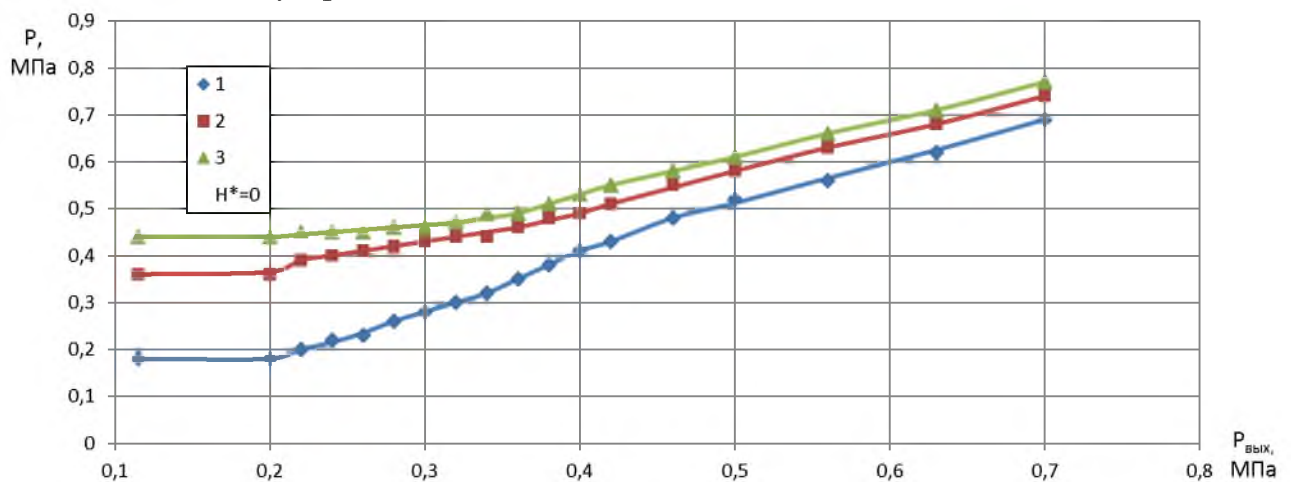


Рис. 3.17. Зависимости давления в следе за стаканом при  $P_{\text{вх}}=\text{const}$ ,  $P_{\text{вых}}=\text{var}$  для двух рядов тел: 1 –  $L^*=2,8$ ; 2 –  $L^*=3,85$ ; 3 –  $L^*=5,5$

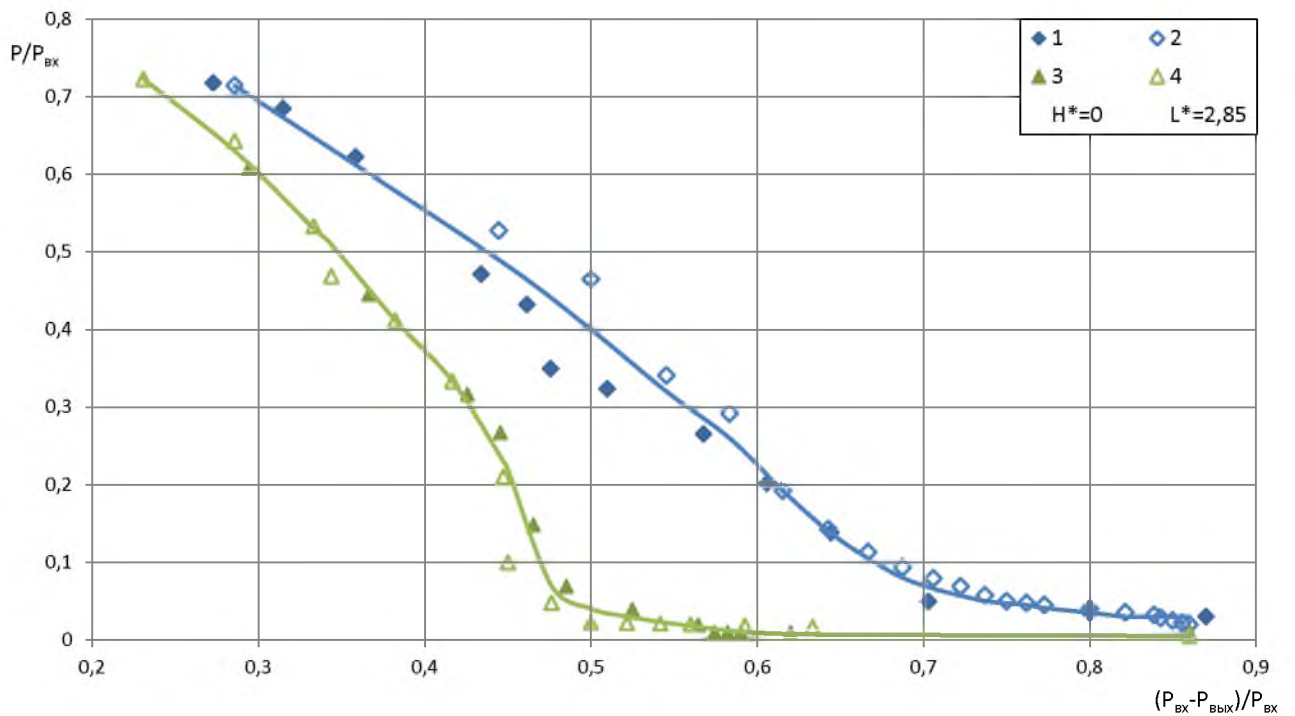


Рис. 3.18. Зависимости относительного давления в следе за цилиндром для двух рядов тел: 1 –  $P_{\text{вх}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{вых}} = \text{var}$ ; 2 –  $P_{\text{вх}} = \text{var}$ ,  $P_{\text{вых}} = \text{const}$  и одного ряда: 3 –  $P_{\text{вх}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{вых}} = \text{var}$ ; 4 –  $P_{\text{вх}} = \text{var}$ ,  $P_{\text{вых}} = \text{const}$ .

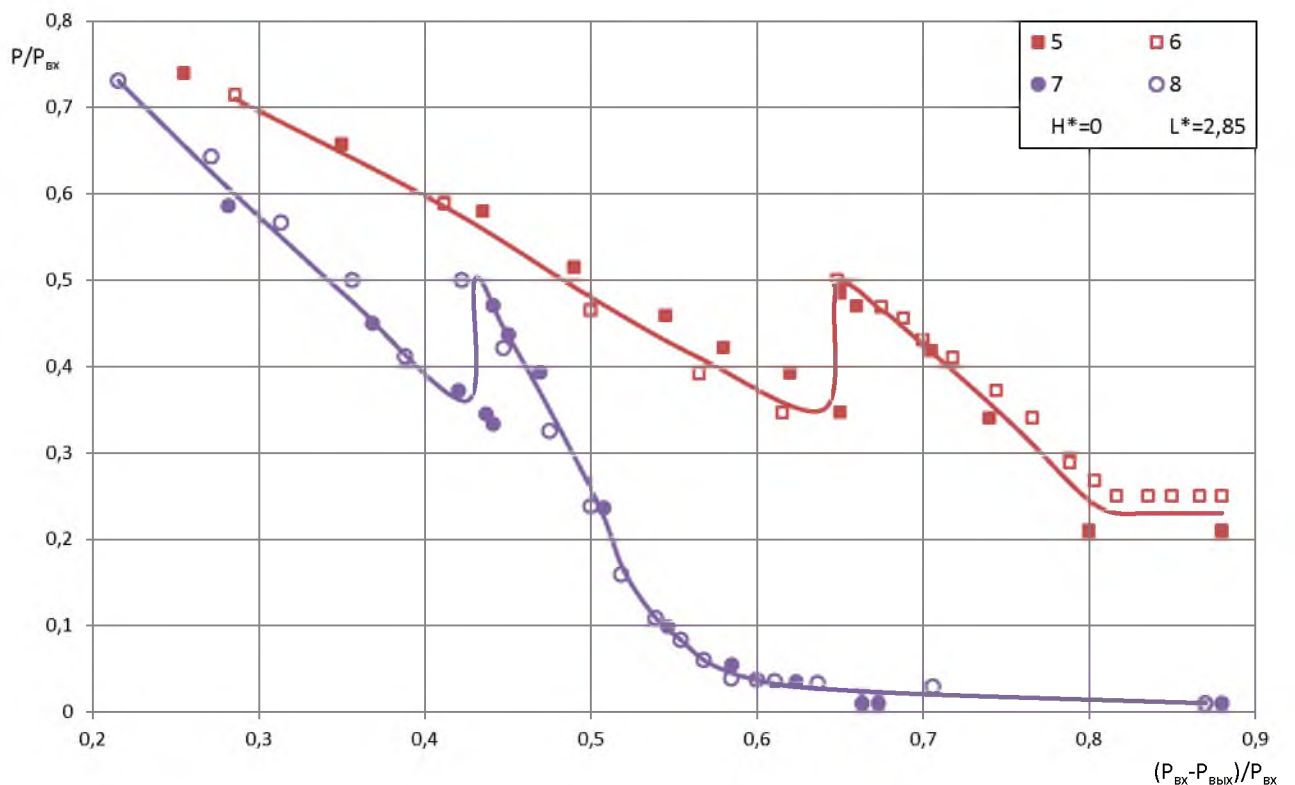


Рис. 3.19. Зависимости относительного давления в следе за пластиной для двух рядов тел: 5 –  $P_{\text{вх}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{вых}} = \text{var}$ ; 6 –  $P_{\text{вх}} = \text{var}$ ,  $P_{\text{вых}} = \text{const}$  и одного ряда: 7 –  $P_{\text{вх}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{вых}} = \text{var}$ ; 8 –  $P_{\text{вх}} = \text{var}$ ,  $P_{\text{вых}} = \text{const}$ .

Распределение давления в следе за телом обтекания стакан всегда явно выражено в большем давлении на оси канала. Это подтверждают следы кавитации, говорящие о параллельном движении вихрей. При этом во всех точках измерения статическое давление намного выше давления насыщения. От части это объясняется смещением места отрыва потока к входу в генератор на 1 калибр.

При первом взгляде, полученные абсолютные зависимости не имеют ничего общего, однако, приведение экспериментальных данных к безразмерному виду с использованием входного давления  $P_{вх}$  для соответствующего режима позволяет получить практически совпадающие экспериментальные зависимости  $P/P_{вх} = f((P_{вх} - P_{вых})/P_{вх})$  при изменении либо выходного давления  $P_{вых}$ , либо входного –  $P_{вх}$ , что показано на рисунках 3.18-3.19.

Измерение статического давления в координатах  $L^*=3,15$   $H^*=0,13; 0,37$  отражает неравномерность поля давления поперек потока за телами обтекания и существенно зависит от характера обтекания этих тел. Зафиксирован интересный момент понижения измеренного статического давления от центра канала, а затем его повышения при значительной величине давления на выходе из генератора. Например, для пластины и серпа при этих противодавлениях меняется характер уноса материала с контрольной вставки. При большем расходе вихри срываются с тела обтекания и под действием отрицательного давления на оси канала изменяют свое параллельное движение и начинают скрещиваться, что хорошо видно на рисунках главы 3.1, 3.3.

Хотя частота срыва вихрей намного выше частоты отклика технического манометра, но отмечались отдельные низкочастотные всплески давления в ходе проведения экспериментов. Согласно математической модели, вихри распространяются практически до 2 ряда тел обтекания, даже когда их нельзя увидеть визуально в виде паровой области.

### 3.6. Исследование влияния внешней турбулентности потока на формирование кавитационных явлений

Ранее было экспериментально установлено, что повышение турбулентности потока на поверхности цилиндра с помощью нанесения на нее насечки приводит к повышению интенсивности кавитационных процессов в виде увеличения амплитуды колебаний давления в 1,3 раза и уноса материала с контрольной вставки в 2,5 раза. Данное явление привело к разработке модернизированного канала проточного волнового генератора с дополнительной турбулизацией пограничного слоя и всего набегающего потока в целом.

Известно, что при обтекании поверхностных вихрегенераторов в виде лунок различной формы, теплоотдача от поверхности к потоку среды увеличивается в 2,5 раза за счет существенного повышения турбулентности пограничного слоя и потока в целом [95]. При этом сопротивление канала практически не изменяется. Данные факты использованы для улучшения технико-экономических показателей волнового проточного генератора и экспериментальным путем определена его эффективность. Фрагмент проточного канала с участком поверхностных вихрегенераторов (лунок) для повышения интенсивности технологического процесса формирования тонкодисперсных ЭНЖ приведен на рисунке 3.20.

Для повышения турбулентности набегающего потока на стенке канала перед первым рядом тел обтекания нанесены конусообразные лунки длиной, равной  $2,75d$ . При этом они расположены под углом  $45^\circ$  к направлению потока. Данная форма лунок и их расположение согласно [95] создают максимальную турбулизацию пограничного слоя и потока в целом.

Для проведения исследований была выбрана конфигурация проточного канала волнового генератора с установленными в один ряд телами обтекания – цилиндр, цилиндр с насечкой и пластина. Проведены исследования по выявлению интенсивности протекания кавитационных процессов на увеличенной контрольной свинцовой вставке, согласно методике, приведенной в разделе 2.4. Использование данной вставки способствует получению максимально полной информации по уносу материала в зависимости от теплофизических параметров

работы проточного генератора на всей траектории движения кавитационных вихрей. Примеры фотографий увеличенной контрольной вставки с максимальным эрозионным износом приведены на рисунке 3.21.

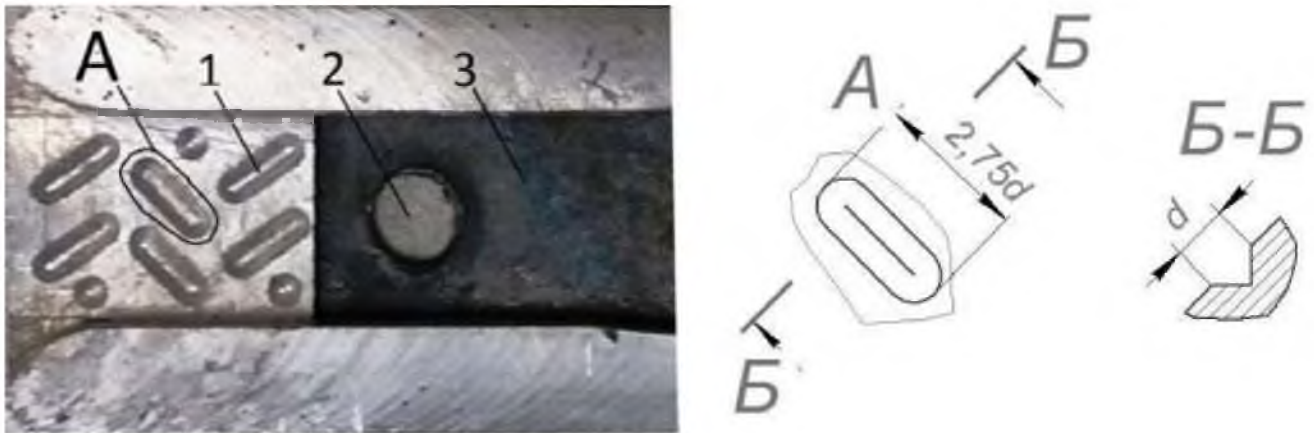


Рис. 3.20. Часть проточного канала с участком поверхностных вихрегенераторов (лунок) для повышения интенсивности технологического процесса формирования тонкодисперсных ЭНЖ

- 1 – место установки тела обтекания; 2 – поверхностные вихрегенераторы- лунки  
3 – контрольная свинцовая вставка

В результате проведенных экспериментов выявлено, что установка участка поверхностных вихрегенераторов в виде лунок перед побудителями кавитации приводит к увеличению интенсивности уноса материала с контрольной вставки для всех тел обтекания на ~ 15-20%, что соответствует улучшению дисперсности эмульсии на 13%, что будет показано в главе 4. Здесь также отмечено смещение области максимального уноса по параметру относительного перепада давления на генераторе. Из опытных данных по следам эрозии на контрольных образцах следует, что места их расположения находятся на всем протяжении движения вихрей, от места их отрыва на теле обтекания до места полного схлопывания, где наблюдается наиболее глубокий унос, что согласуется с результатами в [79].



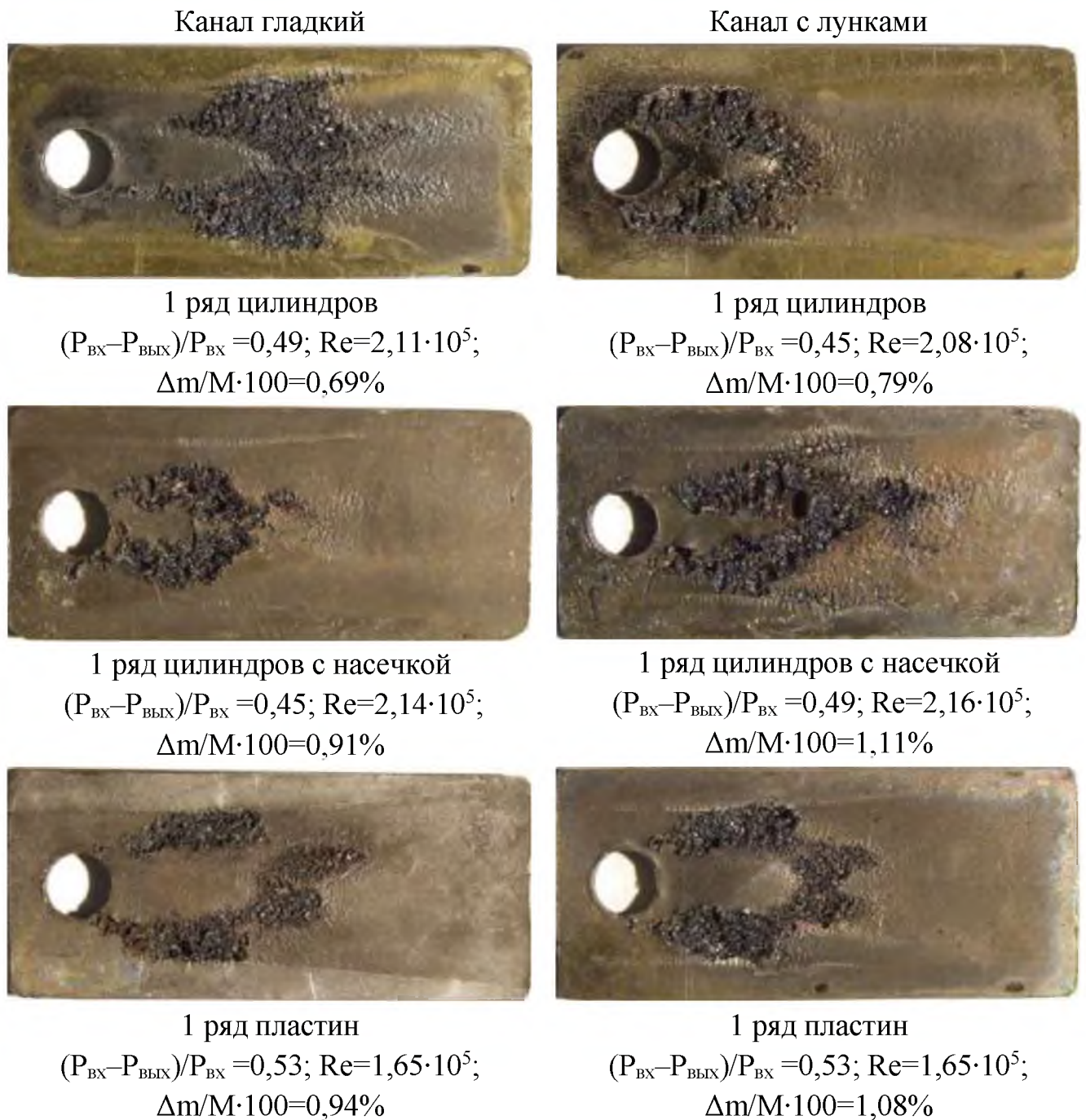


Рис. 3.21. Фотографии следов кавитационной эрозии на контрольном образце увеличенного размера для различных тел обтекания при максимальном уносе и

$$P_{\text{ВХ}}=\text{const}, P_{\text{ВЫХ}}=\text{var}$$

Совокупность полученных экспериментальных результатов приведена на графике зависимости относительного уноса массы материала с контрольной вставки от относительного перепада давления на генераторе (рисунок 3.22). Наибольший унос материала достигается при установке в канал генератора тел



обтекания таких, как цилиндр с насечкой и пластина, что также подтверждает ранее полученные результаты для ограниченного контрольного образца.

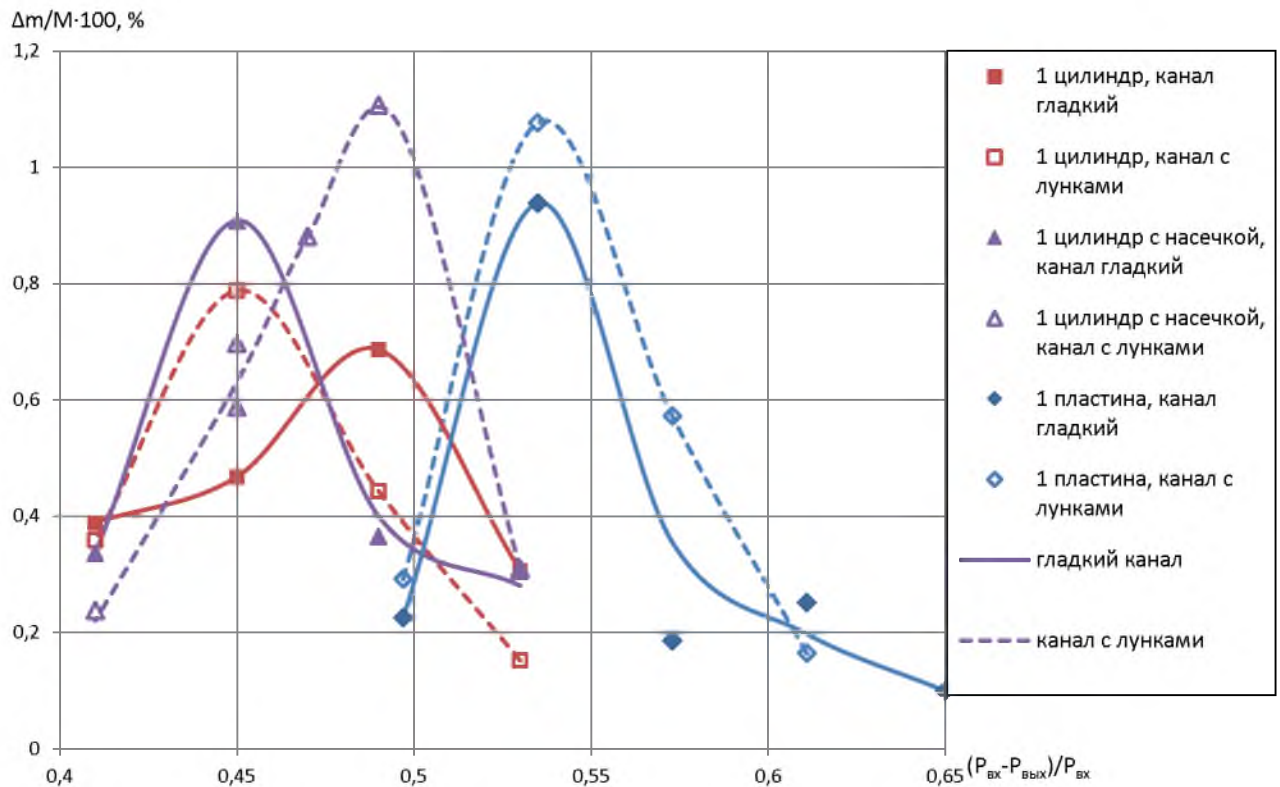


Рис. 3.22. Зависимости  $\Delta m/M \cdot 100 = f((P_{вх} - P_{вых})/P_{вх})$  для различных тел обтекания в канале с большой вставкой и наличием поверхностных вихрегенераторов-лунок (рабочая жидкость – вода)

### 3.10. Выводы по главе 3

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено:

1. В плоском профилированном канале волнового генератора проточного типа при числах  $Re \geq 10^4$  за телами обтекания: цилиндр, цилиндр с насечкой, пластина, серп, стакан – возникают обширные области кавитации со следами эрозии на стенках генератора.

2. Наибольшая интенсивность кавитации, определяемая по величине уноса материала, реализуется в генераторе с телами обтекания: цилиндр с насечкой и пластина.

3. За первым рядом тел обтекания на определенных частотах возникают характерные пики колебания давления. Зависимость характерных частот процесса возникновения этих пиков ( $f$ ) от числа  $Re$  носит линейный характер и выражается соотношением  $f=0.0068 \cdot Re$ . При этом число Струхала  $Sh$  постоянно и равно  $Sh=0,34$ .

4. Получены фундаментальные данные о распределении статического давления в следе за телами обтекания различной формы в плоском профилированном канале. Данные материалы помогут подтвердить и уточнить математические модели обтекания тел различной формы;

5. Нанесение насечки на поверхность гладкого цилиндра приводит к интенсификации кавитации, увеличению амплитуды колебаний давления позади тела обтекания в 1,2-1,3 раза, а также к увеличению уноса материала с контрольной свинцовой вставки в 2,5 раза, что является показателем интенсивности схлопывания кавитационных пузырьков;

6. Наличие вихрегенераторов в виде лунок на поверхности канала перед телом обтекания приводит также к дополнительному увеличению интенсивности кавитационных процессов в виде уноса материала с контрольной свинцовой вставки на 15-20%;

7. Использование двух рядов тел в проточном волновом генераторе, варьируя компоновочные размеры проточной части при проектировании, позволяет создавать автономную кавитационную область в рабочей зоне волнового генератора, обладающую определенными свойствами интенсивности кавитационного воздействия на обрабатываемую среду в определенном диапазоне изменения теплофизических параметров работы генератора.

## ГЛАВА 4. Формирование тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся жидкостей

Приготовление тонкодисперсных, однородных и стабильных эмульсий является актуальной, остро стоящей на сегодняшний день во множестве отраслей промышленности, проблемой. Существующие методы либо не обеспечивают необходимой дисперсности получаемого продукта, либо отличаются относительно высоким энергопотреблением при низкой производительности. Полученные непосредственно в различных технологических процессах в проточном режиме тонкодисперсные, однородные и высокостабильные эмульсии с широким диапазоном количественных соотношений смешиваемых потоков находят свое широкое применение в различных отраслях промышленности, как в виде конечного продукта, так и в качестве промежуточных продуктов технологических процессов на линиях химических, пищевых и других производств [96,97].

### 4.1. Исследование влияния кавитации на образование однородных эмульсий в проточном волновом генераторе плоского типа

Полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований данные о форме и характере течения жидкости в плоском профилированном канале с установленными в него телами обтекания различной формы, об уровнях колебаний давления, об интенсивности возникающих кавитационных явлений, а также о влиянии на них внешней турбулентности, способствовало нахождению наиболее эффективных режимов работы волнового генератора для создания тонкодисперсных, однородных и высокостабильных эмульсий.

Первоначально эксперименты по влиянию кавитации на формирование тонкодисперсных эмульсий проводились при смешении 5% индустриального масла И-50А с водой с различными телами обтекания при отсутствии и наличии кавитации по методике, описанной в разделе 2.5. Оптимальным кавитационным режимом были выбраны параметры работы волнового генератора, соответствующие максимальному уносу материала с контрольной вставки.

Фотографии картин распределения частиц масла в воде и зависимости  $q_i/Q \cdot 100 = f(d)$  для волнового генератора с различными телами обтекания без кавитации и при наличии кавитационной обработки представлены на рисунках 4.1-4.2.

Исследования показали, что наличие режима интенсивного схлопывания кавитационных пузырьков привело к дополнительному дроблению капель эмульсий в генераторе со всеми видами тел обтекания, что видно на рисунке 4.2. Эмульсия, полученная при чисто турбулентном течении без кавитации, содержит более крупные капли, что свидетельствует о худшем качестве получаемой смеси. Примеры фотографий полученных эмульсий показаны на рисунке 4.1. На режимах, при которых в проточной части генератора возникает кавитация, эмульсия получается тонкодисперсной и гомогенной. Размер частиц дисперсной фазы не превышает 20 мкм, при этом около 90% частиц имеет размер не более 5 мкм, а свыше 70% частиц – размер не более 3 мкм.

Из испытанных тел обтекания наиболее эффективными оказались варианты: цилиндр с насечкой, при использовании которого даже при безкавитационном обтекании получается качественная эмульсия, что связано с существенным увеличением турбулентности потока и более эффективным перемешиванием, а также пластина, при обтекании которой потоком жидкости возникают колебания давления высокой амплитуды, способствующие дроблению капель эмульсии. Плохообтекаемые тела (пластина, серп, стакан) способствуют образованию тонкодисперсной эмульсии, но увеличивают гидродинамическое сопротивление, что негативно сказывается на их применении.

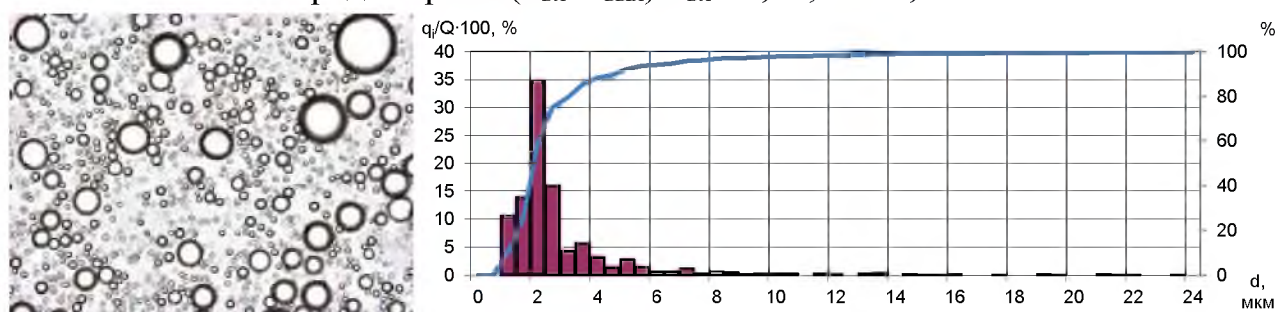
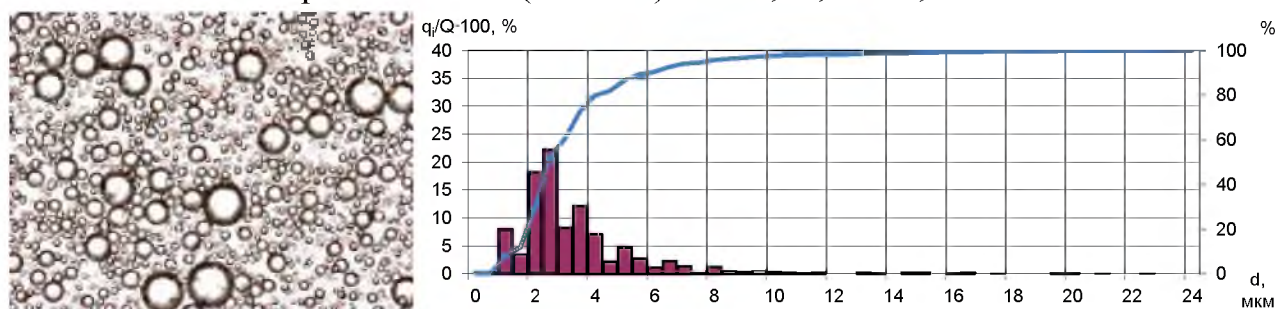
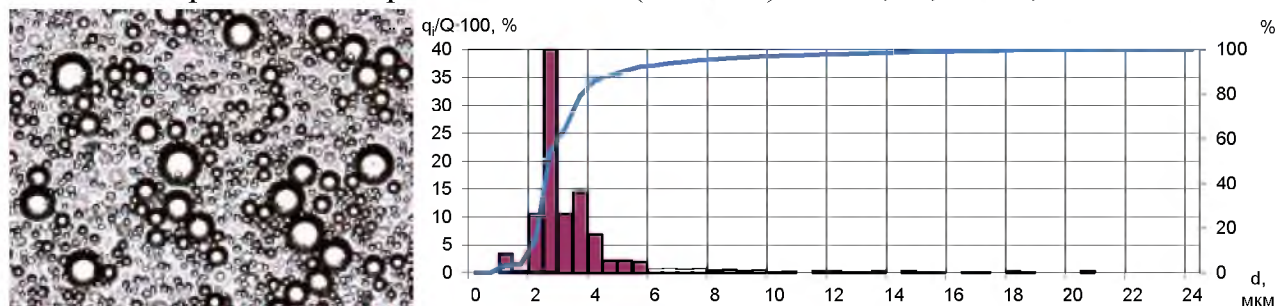
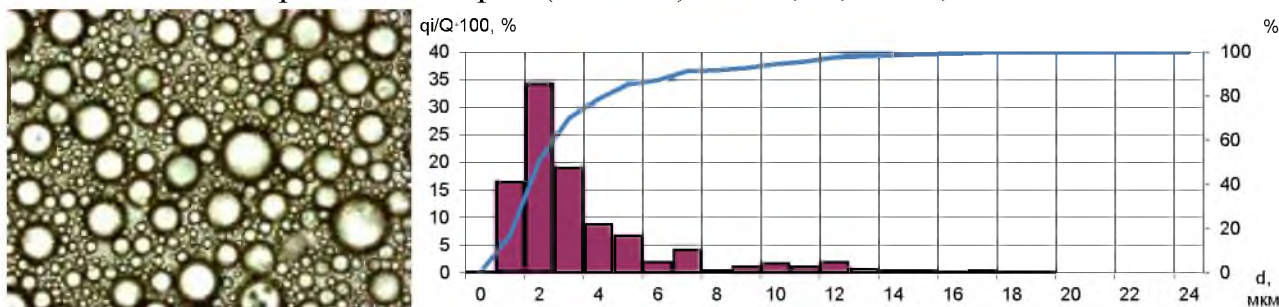
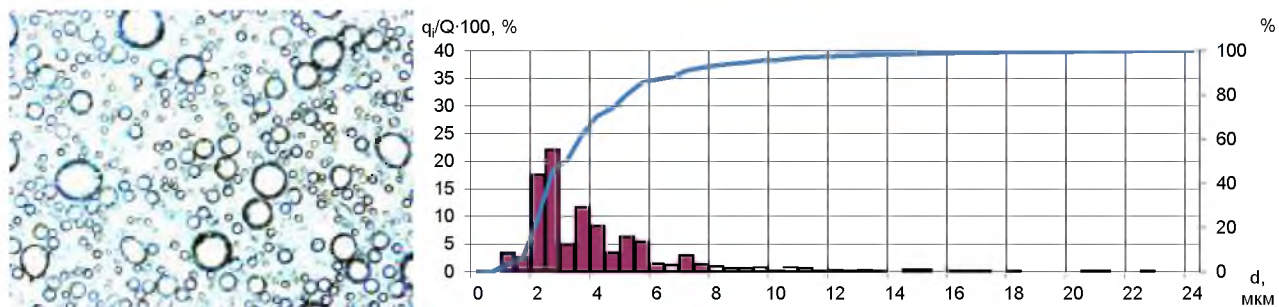


Рис.4.1. Фотографии картин распределения частиц масла в воде и зависимости  $q_i/Q \cdot 100 = f(d)$  для генератора с различными телами обтекания без кавитации



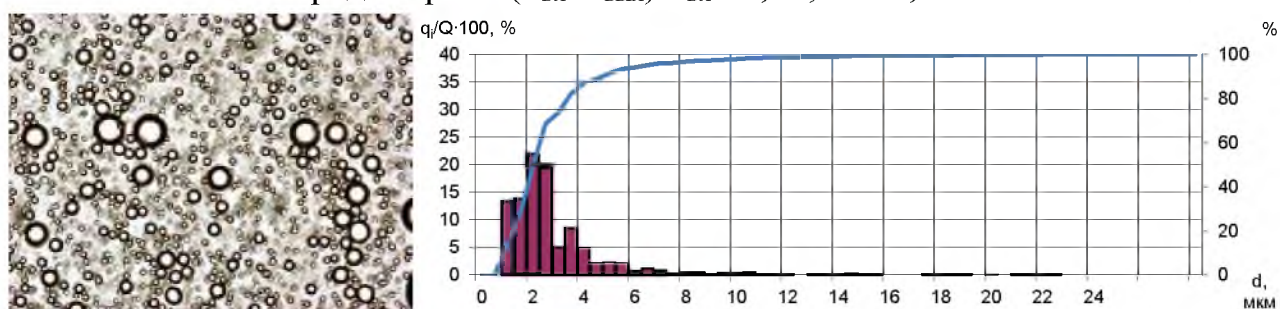
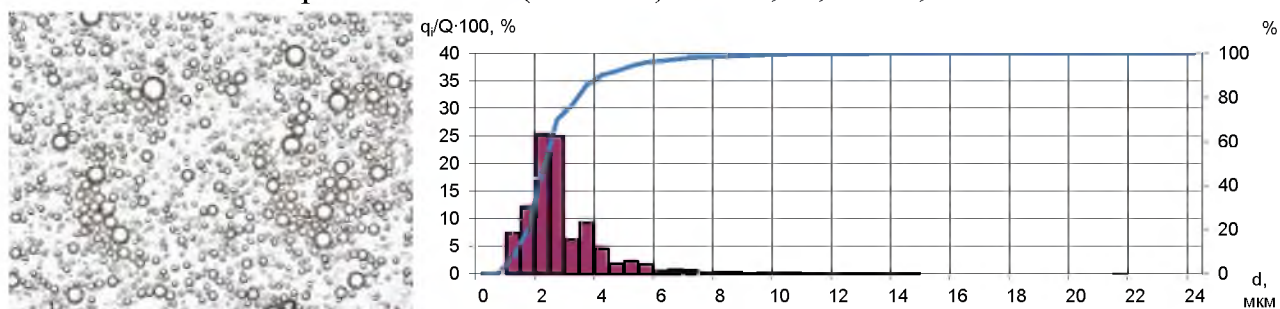
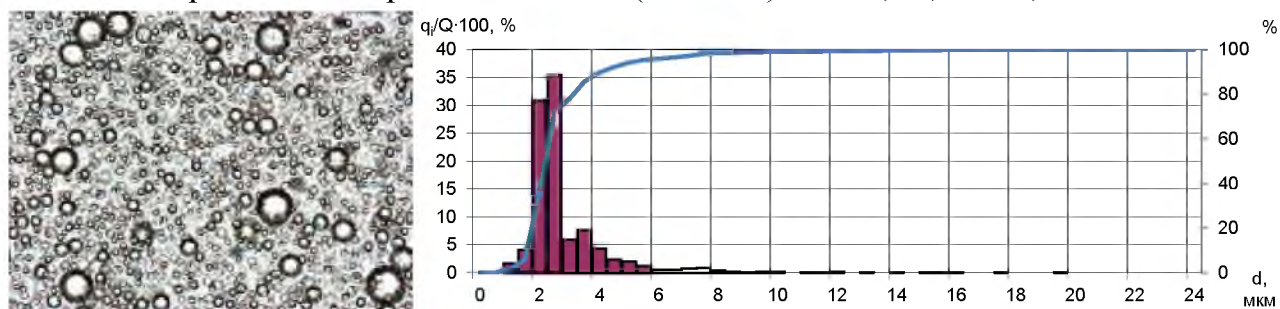
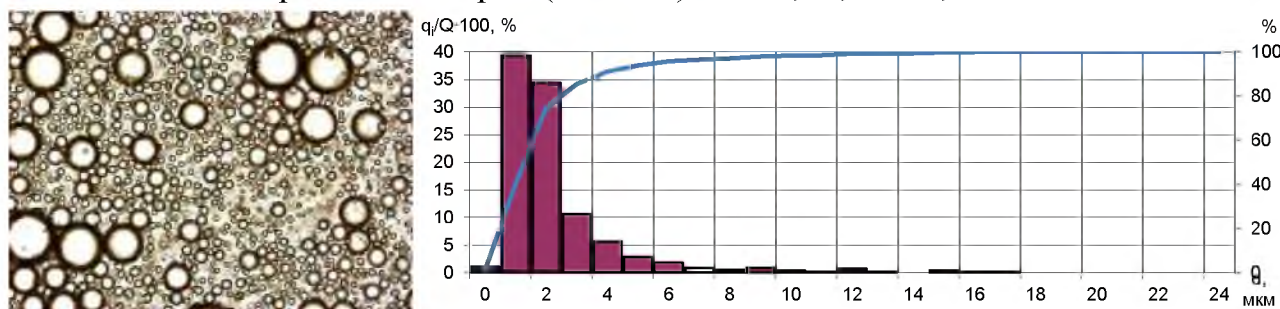
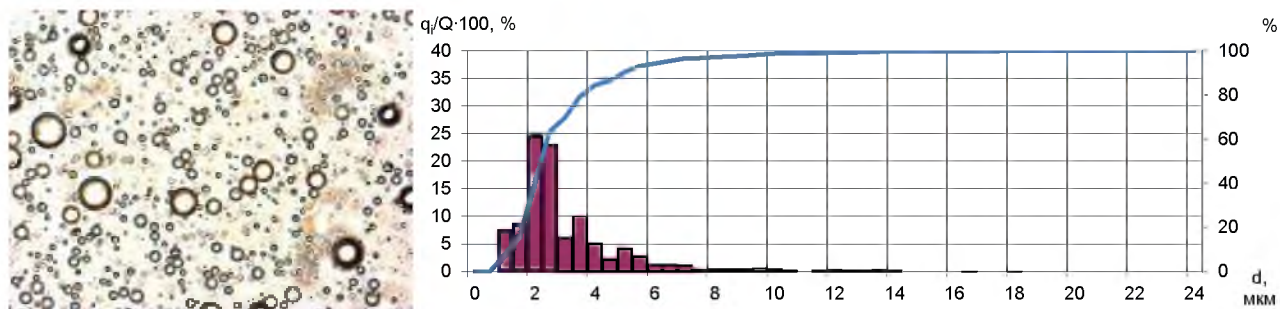


Рис.4.2. Фотографии картин распределения частиц масла в воде и зависимости  $q_i/Q \cdot 100 = f(d)$  для генератора с различными телами обтекания с кавитацией

Для выявления влияния внешней турбулентности на формирование тонкодисперсных эмульсий проведены экспериментальные исследования по смешению масел различной вязкости в волновом генераторе с установленным в один ряд телом обтекания – цилиндром с насечкой и наличием лунок на поверхности канала перед ним. По данным уноса материала с контрольной вставки такая компоновка проточной части позволяет увеличить интенсивность кавитации более чем на 60% по сравнению с использованием гладких канала и цилиндра.

Исследования проводились на маслах в широком диапазоне изменения кинематической вязкости, приведенной в таблице 4.1.

Таблица 4.1

## Характеристики используемых масел

	Индустриальное масло И-50А	Подсолнечное масло	Турбинное масло ТП-22с (марка 2)	Трансформаторное масло ГК
Кинематическая вязкость при 40 °С, $\nu$ , мм <sup>2</sup> /с	100	60	32	9

Фотографии картин распределения частиц масел в воде и зависимости относительного количественного распределения размеров капель эмульсии  $q_i/Q \cdot 100 = f(d)$  для генератора с телом обтекания – цилиндр с насечкой, установленного в один ряд и каналом с лунками приведены на рисунке 4.3.

В результате экспериментов установлено, что наличие лунок, а также установка одиночного тела обтекания – цилиндра с насечкой, приводит к улучшению качества получаемой водомасляной эмульсий. Содержание капель размером до 3 мкм составляет 90% для масла И-50А, что выше, чем при исходной конфигурации волнового генератора (~78%). Наличие кавитации также способствует уменьшению размеров капель, что видно на рисунке 4.3 для двух режимов с индустриальным маслом.

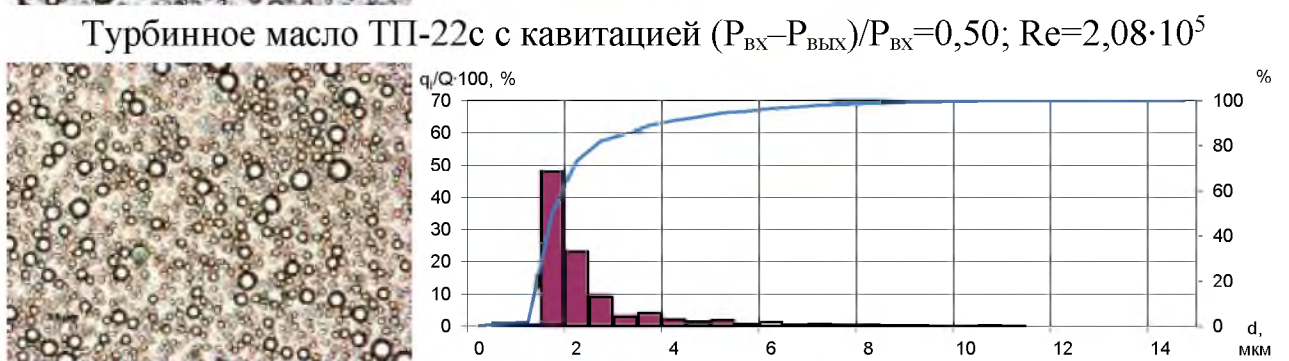
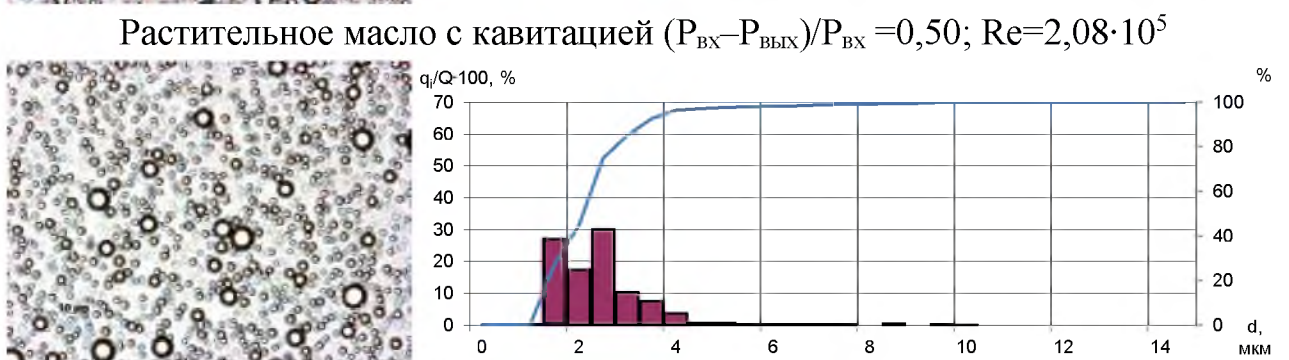
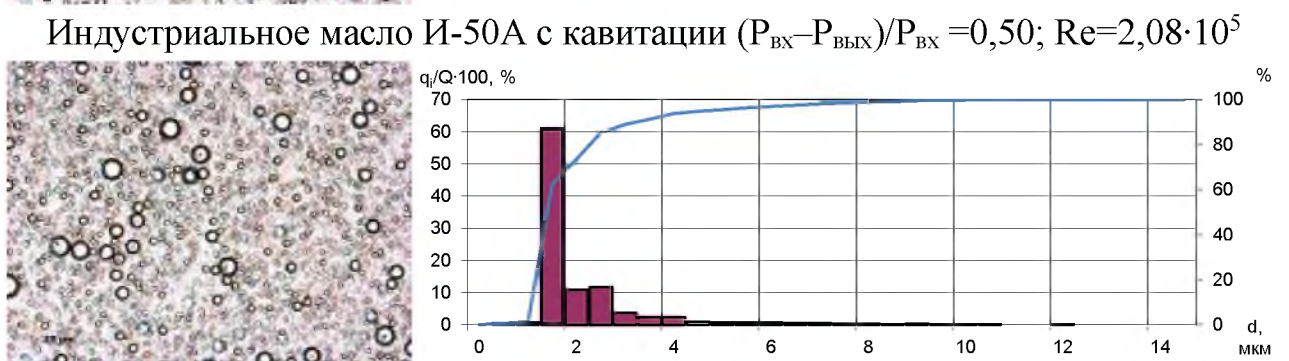
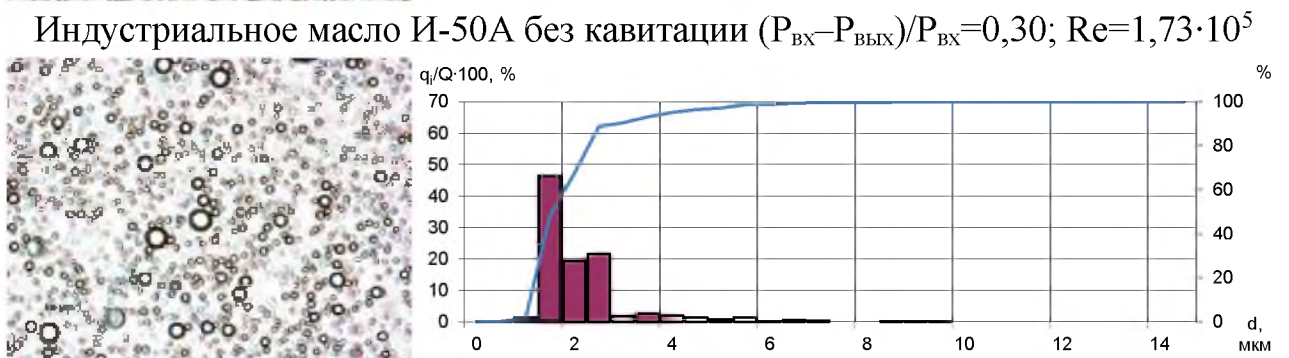
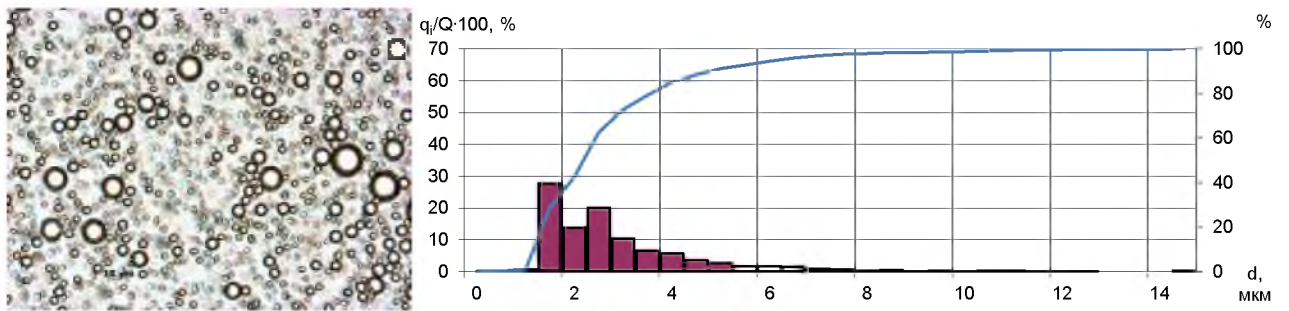


Рис.4.3. Фотографии картин распределения частиц масел в воде и зависимости  $q_i/Q \cdot 100 = f(d)$  для генератора с цилиндром с насечкой и каналом с лунками



На режиме кавитации в волновом генераторе водомасляная эмульсия с растительным нерафинированным маслом получается тонкодисперсной с преобладающим размером капель (60%) от 1,5 до 2 мкм, что, связано с наличием дополнительных природных эмульгаторов в составе масла.

Обобщенный анализ результатов смешения масел с различной вязкостью, представленный на рис. 4.3 показал, что при смешении с водой высоковязкого индустриального масла И-50А в генераторе с лунками и одним телом обтекания – цилиндром с насечкой, 89% капель достигает размера меньше 3 мкм, а 96 % – до 5 мкм. Уменьшение вязкости масла приводит также к незначительному увеличению размеров капель, что показано на рисунке 4.4 зависимостями 1 и 2, соответственно.

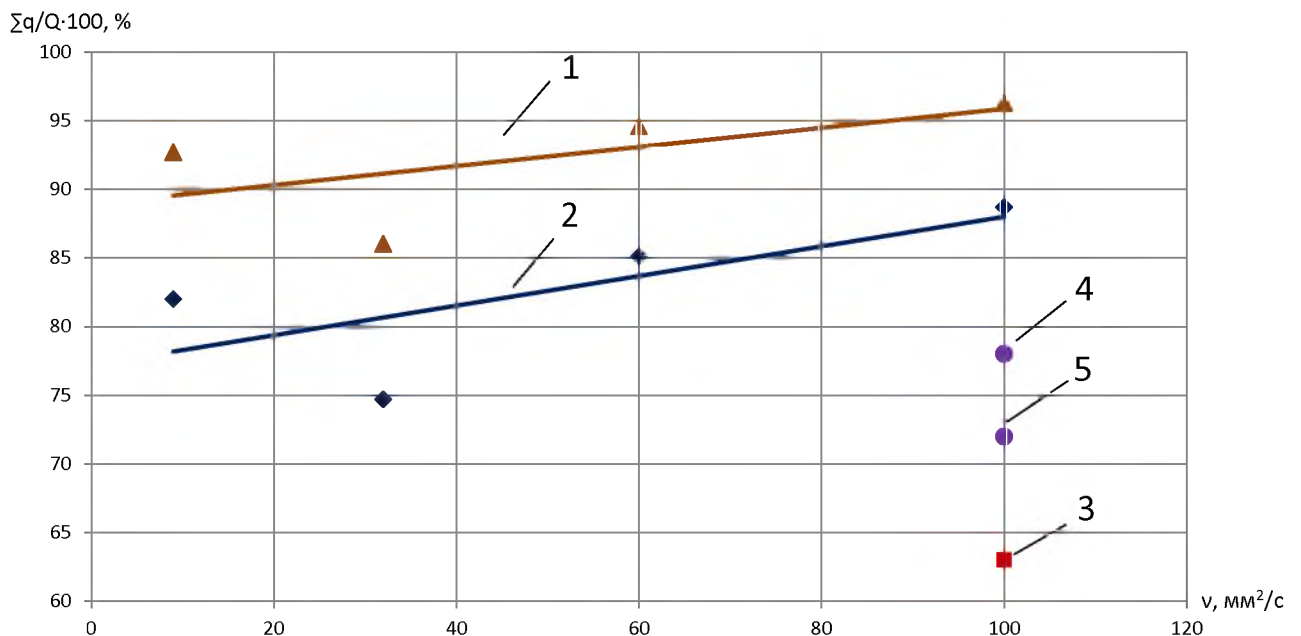


Рис.4.4. Зависимости  $\Sigma q/Q \cdot 100=f(v)$  для различных вариантов конструктивных решений в генераторе:

1,2,3 – одиночный цилиндр с насечкой, канал с лунками, размер капель:

1 – до 5 мкм; 2 – до 3 мкм; 3 – до 3 мкм без кавитации;

4, 5 – гладкий канал: 4 – 3 цилиндра с насечкой, размер капель до 3 мкм; 5 – 3 гладких цилиндра, размер капель до 3 мкм

Здесь же показаны данные по суммарному относительному числу капель эмульсии индустриального масла с водой размером до 3 мкм для волнового

генератора исходной конфигурации с гладким каналом и двумя рядами тел обтекания – 3 цилиндра с насечкой (4) и 3 гладких цилиндра (5), что свидетельствует о повышении эффективности применения одиночного тела обтекания (цилиндр с насечкой и канала с лунками) для дробления капель. При безкавитационном режиме течения с 1 цилиндром с насечкой (3) и наличием на поверхности канала лунок эмульсия получается наиболее плохого качества.

#### 4.2. Оценка энергозатрат работы проточного волнового генератора плоского типа для формирования тонкодисперсных эмульсий

Показатель удельных энергозатрат на производство какой-либо продукции является важным показателем экономической эффективности работы данного устройства. Уменьшение этого показателя без ухудшения качества готовой продукции является основной задачей оптимизации и поиска новых конструкторских решений в сфере создания смесительных устройств для формирования тонкодисперсных высокоомогенных эмульсий.

Оценка энергозатрат проводилась на основе перепада давления на волновом генераторе при максимально эффективном режиме его работы по формуле (2.1). КПД вихревого насоса при 80% нагрузки выбран 0,7. Данная методика позволяет оценить энергозатраты на работу волнового генератора при установке его в проточную часть технологической линии в виде дополнительного сопротивления, создаваемого генератором, при этом используется потенциальная энергия потока на выходе из генератора. В большинстве случаев при такой установке волнового смесителя не требуется замена насосного оборудования, т.к. часто имеется запас по его производительности.

Оценки удельных энергозатрат для различных компоновочных решений проточной части плоского волнового генератора приведены в таблице 4.2 Видно, что на экспериментально определенных режимах максимального волнового кавитационного воздействия на обрабатываемую среду генератор требует 0,2-0,3 кВт/(т/час) прокачиваемого продукта, что составляет 0,5-0,7 МПа

Удельные оценки энергозатрат проточного волнового генератора плоского типа

№	Компоновка волнового генератора	Гидродинамический режим течения		W, кВт/(т/час)
		$(P_{вх} - P_{вых})/P_{вх}$	Re	
1	1 ряд цилиндров с насечкой, канал с лунками	0,49	$2,20 \cdot 10^5$	0,195
2	2 ряда цилиндров	0,56	$2,03 \cdot 10^5$	0,226
3	2 ряда цилиндров с насечкой	0,62	$2,08 \cdot 10^5$	0,260
4	2 ряда пластин	0,75	$1,63 \cdot 10^5$	0,298
5	2 ряда серпов	0,74	$1,57 \cdot 10^5$	0,298
6	2 ряда стаканов	0,88	$1,75 \cdot 10^5$	0,325

Однако применение отдельной линии смешения и формирования эмульсии типа «из бака в бак», при которой полностью теряется энергия потока, поднимает энергозатраты данного генератора до примерно 0,55 кВт/(т/час).

Для сравнения в таблице 4.3. приведены энергозатраты других типов смесительных устройств по приведенным в широком доступе характеристикам.

Таблица 4.3

#### Энергозатраты различных смесительных устройств

№	Вариант смесительного устройства	W, кВт/(т/час)	Недостатки
1	Вихревой волновой генератор [97]	19,80	эн-затраты
2	Ультразвуковой диспергатор UIP10000 [102]	1,000	подв. часть
3	Роторно-импульсные аппараты РИА-250 [98]	0,620	подв. часть
4	Установка кавитационная УКГ-14М [99]	0,600	подв. часть
5	Гомогенизатор топлива TRGA [103]	0,260	регул. расх.
6	Ультразвуковой диспергатор УЗГ-01.20 [100]	0,250	подв. часть
7	Кавитатор-эмульгатор мазута КЭМ [101]	0,200	подв. часть
8	Роторный кавитатор РАФ-14 [99]	0,183	подв. часть

По приведенным данным видно, что существует немало смесительных устройств с аналогичными энергозатратами, однако большинству из них присущи основные недостатки: это наличие подвижных частей и технически сложной конструкции. При использовании же проточного волнового генератора плоского

типа эмульсия получается такой же тонкодисперсной, при этом существуют широкие компоновочные возможности монтажа волнового генератора в новое или существующее промышленное проточное оборудование.

#### 4.3. Выводы по главе 4

В результате проведенных экспериментальных исследований по формированию тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся жидкостей в проточном волновом генераторе плоского типа было установлено:

1. Добавление в воду на входе в генератор 5% индустриального масла при наличии кавитации приводит к образованию тонкодисперсной эмульсии с размером частиц до 20мкм, причем, половину из них составляют частицы масла размером менее 5мкм;

2. Нанесение лунок на поверхность рабочего канала совместно с насечкой на поверхности побудителя кавитации существенно повышают качество получаемой эмульсии. При этом наибольшая эффективность смешения в плоском генераторе достигается при установке только одного ряда тел в виде одиночного цилиндра;

3. Увеличение вязкости добавочной компоненты и наличия кавитации при создании водомасляной эмульсии приводит к увеличению концентрации более мелких капель, значение которой достигает 88% и 96% для капель меньше 3 мкм и 5 мкм, соответственно;

4. В ходе выполнения работ по данной теме были сконструированы и испытаны прототипы устройств, применение которых экономически оправдано в технологических линиях различных отраслей промышленности.

## ГЛАВА 5. ПРИМЕНЕНИЕ ПЛОСКОГО ВОЛНОВОГО ГЕНЕРАТОРА В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В данной главе приведены результаты лабораторных и промышленных испытаний применения проточного волнового генератора для формирования тонкодисперсных эмульсий и эмульсий с заданной дисперсностью для различных областей промышленности [104-108].

### 5.1. Очистка нерафинированного масла

Хорошо известно, что воздействие на среду интенсивных волновых полей наряду с интенсивным перемешиванием может инициировать, а также ускорить протекание большого числа различных процессов и реакций. Увеличение выхода продуктов реакций и КПД процессов происходит за счет энергии волнового поля, генерируемого в жидкой среде. Это явление нашло множество применений. Хотя слишком высокое давление или температура могут оказывать негативное воздействие, результат при применении оптимизированного волнового воздействия оказывается положительным [1].

Неочищенное соевое масло в присутствии небольшого количества рафинирующего реагента может быть быстро рафинировано с использованием ультразвуковой акустической обработки. По такой технологии удаляется 90-99% фосфолипидов. Однако следует заметить, что акустическая техника должна использоваться в ограниченном пространстве. Поскольку влияние волн ослабевает с удалением от источника излучения, эффективность ультразвуковой обработки зависит от размера резервуара. При больших резервуарах эффективность обработки низкая. Изменения, вызванные обработкой, наблюдаются в определенных участках, в зависимости от частоты излучения и, таким образом, они распространены неравномерно. Кроме того, ультразвуковая обработка не может эффективно применяться в непрерывном высокопроизводительном процессе. Такая технология требует слишком больших энергетических и временных затрат, и поэтому высокопроизводительный процесс рафинации становится экономически невыгодным. Суммарное потребление

электроэнергии всех ультразвуковых устройств может достигать 2 кВт на т/час расхода жидкости [109].

В отличие от ультразвуковой техники, использование волновых генераторов позволяет создавать проточные системы высокой производительности. Использование разработанной волновой технологии рафинации позволяет получать продукт с улучшенными свойствами, при этом в процессе обработки затрачивается меньше времени и энергии (проточный волновой генератор плоского типа расходует в среднем 0,2-0,25 кВт дополнительной мощности на т/час прокачиваемой жидкости), и накапливается меньше отходов, опасных для окружающей среды.

Экспериментальное исследование влияния кавитации и волновых полей на характеристики эмульсий и испытания волнового метода рафинации растительных масел проводились на гидродинамическом стенде №3 НЦ НВМТ РАН, принципиальная схема которого показана на рисунке 2.1, схема канала проточного волнового генератора представлена на рисунке 2.2 раздела 2.

В генераторе благодаря установленным телам обтекания создаются отрывные зоны с пониженным статическим давлением, в которых образуются кавитационные области и пузырьки. При попадании их в зону повышенного давления, пузырьки схлопываются и образуются нелинейные колебания давления. Вследствие волнового воздействия на поток происходит дробление водяных капель в водомасляной эмульсии. Кроме того, благодаря наличию тел обтекания достигается высокая степень турбулентности течения, что положительно влияет на гомогенизацию эмульсии.

В качестве основной компоненты эмульсии использовалось негидратированное нерафинированное растительное масло. Химические и физические характеристики использованного растительного масла приведены в таблице 5.1.

В начале испытаний масло в количестве около 100 литров прокачивалось через установку до завершения переходных процессов и выхода волнового генератора на рабочий режим. Вода из бака в рабочий тракт установки не

поступала. После выхода установки на рабочий режим вода в объеме 3% подавалась на вход насоса. Скорость подачи воды составляла порядка 1 л/мин. Расход жидкости составлял  $G \approx 200$  л/мин.

После окончания ввода воды эмульсия обрабатывалась еще дополнительно 1 мин для достижения ее гомогенности, после чего происходил отбор пробы для химического анализа.

Таблица 5.1

## Характеристики растительного масла

Показатель	Ед.изм.	Значение	Метод испытаний
Название продукта	Масло растительное негидратированное		
Плотность	г/см <sup>3</sup>	0,93	
Вязкость 20°С	Ра·с	0,0058	
Вязкость 50°С	Ра·с	0,0021	
Кислотное число	мг КОН/г	2,85	ГОСТ Р 52110
Массовая доля фосфора	мг/кг	571,5	ГОСТ Р 52676
Массовая доля влаги	%	0,06	ГОСТ 11812
Температура вспышки	°С	232	ГОСТ 9287
Перекисное число	мМоль/кг активного кислорода	1,8	ГОСТ Р 51487

Эффективность предлагаемой волновой технологии рафинации сравнивалась с механической обработкой масла, которая моделировалась следующим образом. В неочищенное растительное масло добавлялась в соответствующей пропорции дистиллированная вода, далее смесь обрабатывалась в роторной мешалке. Время обработки составляло 3 мин, скорость вращения 2000 об/мин., объем смеси – 1 литр. Далее смесь нагревалась до 50 °С и отстаивалась в течении 6 часов.

Все пробы до центрифугирования перевозились и хранились 1 сутки при комнатной температуре. Центрифугирование проводилось на лабораторной центрифуге LU-418 (ВНИИЖ). Образцы для центрифугирования (150-200 мл.)

отбирались из общего объема после перемешивания в течение 1-2 мин. Разделение производилось в течение 10 мин при 3500 об/мин. Отделенная от осадка верхняя часть масла сливалась через край.

Полученные результаты рафинации растительного масла представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2

## Содержание фосфатидов в образцах растительного масла

Образец	Содержание фосфатидов в пересчёте на фосфор [мг/кг]	Остаточное содержание фосфатидов [%]
Неочищенное растительное масло	571,5	
Волновая обработка масла без гидратирования	329,5	57,6
Традиционная технология гидратирования масла (3% воды)	155,3	27,2
Волновая обработка масла + гидратирование (3% воды)	107,6	18,8

Полученные результаты показали эффективность очистки масла с помощью единственного волнового воздействия без привлечения рафинирующих химических реагентов. Оптимизация проточного канала и количества промывочной воды приведет к дополнительному улучшению показателей очистки. Простота эксплуатации, высокая надежность и малые энергетические затраты (0,2-0,25 кВт/(т/час)) позволяют внедрить проточный волновой генератор плоского типа в существующее производство без серьезных капитальных затрат.



## 5.2. Технология обессоливания нефти

В НЦ НВМТ РАН были проведены исследования сравнения эффективности применения волновой технологии промывки нефти со стандартной технологией. В ходе экспериментов были проведены испытания волнового генератора [81] и получены образцы водонефтяной эмульсии, приготовленной на этом устройстве.

Наличие солей в нефти причиняет тяжелые и разнообразные осложнения при переработке: коррозию аппаратуры, выпадение осадка, засорение аппаратуры, выделение соляной кислоты в процессе гидролиза, снижение производительности перерабатывающих установок и снижение качества товарных нефтепродуктов.

Для обессоливания нефти применяется большое количество различных методов [110].

К механическим методам, кроме отстаивания нефти, можно отнести такие меры воздействия как перемешивание, вибрация, обработка ультразвуком, фильтрация, способствующие укрупнению капелек воды. В некоторых случаях для интенфикации расслоения особо стойких высокодисперсных эмульсий прибегают к использованию центрифуг или сепараторов. Однако эти способы имеют ограниченную область применения из-за низкой производительности или значительной сложности эксплуатации.

Для разрушения эмульсии в процессах обезвоживания и обессоливания нефти широко применяются подогрев, добавка деэмульгатора, электрообработка, перемешивание. При этом обычно применяют одновременно несколько мер воздействия. Такое комбинированное сочетание ряда факторов воздействия обеспечивает быстрое и эффективное расслоение.

Получило широкое распространение разложение эмульсий электрическим методами, ввиду сравнительной простоты необходимых для этой цели установок, применяемости для большинства эмульсий и достаточной надежности в работе. Электрический способ разрушения эмульсий типа В/Н применяют на нефтеперерабатывающих заводах при обессоливании нефти на ЭЛОУ, а также при очистки нефтепродуктов от водных растворов щелочей и кислот (электрофайнинг). В обоих случаях используют электрическое поле высокой

напряженности. Для достижения минимального содержания остаточных солей в обессоленной нефти (не более  $3\text{мг/дм}^3$ ) нефть промывают несколько раз.

Для моделирования в лабораторных условиях механической промывки нефти смесь воды и нефти была обработана в роторной мешалке.

Испытания волнового метода получения водонефтяной эмульсии и отладки технологического процесса промывки нефти проводились на опытном лабораторном стенде, схема которого представлена на рисунке 5.1.

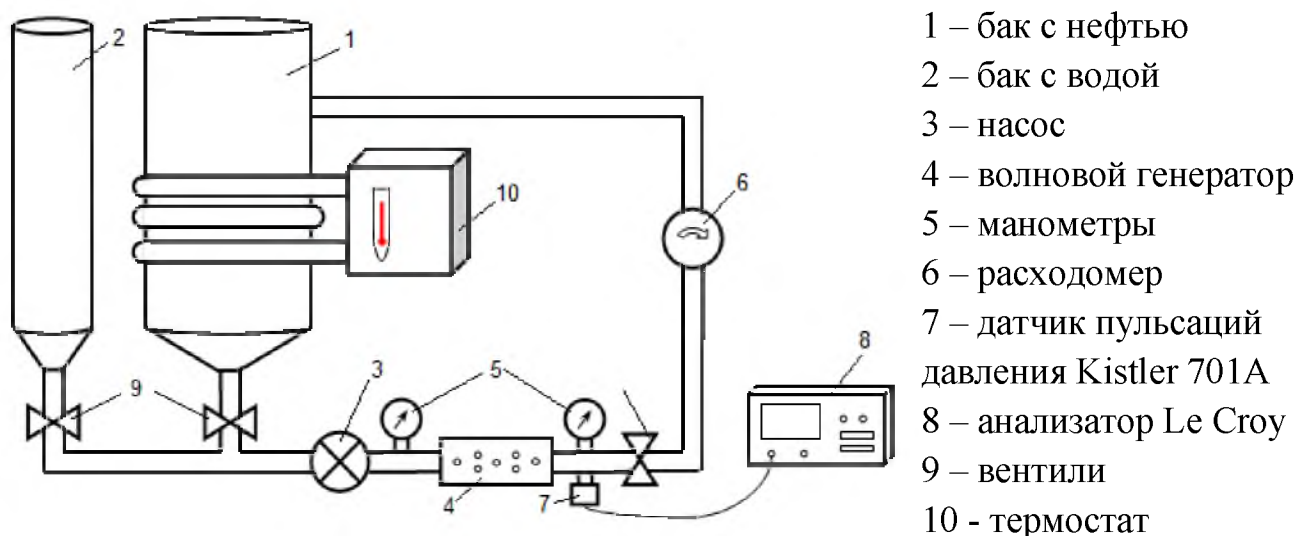


Рис. 5.1. Принципиальная схема экспериментального стенда

В баки 1 и 2 установки заливались соответственно нефть и вода в заранее подобранной пропорции. Нефть из бака 1 с помощью насоса 3 поступала в волновой генератор 4. В нем в набегающем потоке жидкости возбуждаются зоны кавитации, являющиеся источником интенсивного волнового воздействия. Вследствие волнового воздействия на поток происходило дробление водяных капель в водонефтяной эмульсии. Кроме того, благодаря наличию в генераторе кавитационных зон достигалась высокая степень турбулентности течения, что положительно влияло на гомогенизацию эмульсии.

Конструктивные параметры волнового генератора были выбраны на основании расчетов и рекомендации, полученных в результате численного математического моделирования и экспериментальных опытов, приведенных в Главах 2-4. Рабочее давление в генераторе контролировалось с помощью манометров 5, а расход жидкости - расходомером 6. Датчик давления 7 и

анализатор 8 использовались для контроля функционирования волнового генератора.

Подача насоса и рабочее давление регулировались, изменяя частоту вращения привода насоса. Производительность лабораторной установки составила до 3 м<sup>3</sup>/час, максимальное рабочее давление до 1,5 МПа.

Термостат 10 использовался для предварительного подогрева нефти перед процессом получения эмульсии.

В начале испытаний нефть в количестве 20 – 25 литров прокачивалась через установку до завершения переходных процессов и выхода волнового генератора на рабочий режим. Вода из бака 2 в рабочий тракт установки не поступала. После выхода установки на рабочий режим открывался вентиль бака 2 и вода подавалась на вход насоса. Скорость подачи воды составляла порядка 2 л/мин.

После окончания ввода воды эмульсия обрабатывалась еще дополнительно 1 мин для достижения ее гомогенности, после чего происходил отбор пробы. Пример полученной водонефтяной эмульсии для обессоливания на установке ЭЛОУ представлен на рисунке 5.2.

Для моделирования в лабораторных условиях механической технологии промывки нефти смесь нефти и 10% воды была обработана в роторной мешалке. Обрабатываемый объем нефти – 1,5 л. Условия перемешивания – 2000 об/мин. Время перемешивания – 3 мин. И нефть и вода были предварительно подогреты до 70 градусов. В полученном контрольном образце водонефтяной эмульсии часть водяной фракция (менее 5% от общего объема жидкости) выделилась сразу после прекращения динамического воздействия.

Полученные образцы были исследованы на содержание воды в нефти и направлены на обезвоживание и обессоливание на лабораторной установке электрообессоливания и обезвоживания нефти в ОАО «ВНИИ НП». Результаты химического анализа приведены в таблице 5.3.

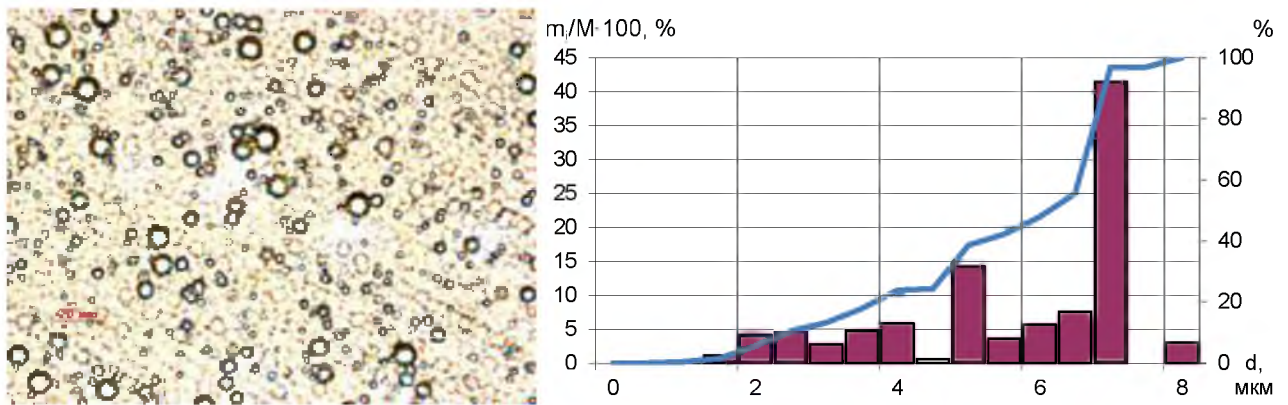


Рис.5.2. Фотография картины распределения капель воды (2,5%) в сырой нефти и зависимости  $m_i/M \cdot 100 = f(d)$

Таблица 5.3

### Результаты химического анализа

№	Метод получения эмульсии	Добавочная вода [%]	Остаточное содержание воды, % (ГОСТ 2477)	Содержание солей, мг/дм <sup>3</sup> (ГОСТ 21534)	Норма вода/соль, %/мг/дм <sup>3</sup> (ГОСТ 21534)
1	механический	10	0,4	23	0,1/5,0
2	Промышленный (3 ступени)	4	0,04	3,05	0,1/5,0
3	волновой	2,5	0,12	3,5	0,1/5,0

Как видно из полученных результатов, волновая технология промывки нефти обеспечивает необходимую степень обессоливания, при этом использовалась одностадийная промывка потока нефти меньшим количеством воды, по сравнению с технологией используемых на предприятиях НПЗ, что позволяет повысить экологичность данной технологии. Достаточно большое количество остаточной воды в пробе, полученной волновым способом, объясняется отсутствием деэмульгаторов.

Широкие возможности компоновочных решений и теплофизических параметров работы волнового генератора дают возможность создания однородной эмульсии необходимого качества (дисперсности). Также при использовании смесительного устройства данного типа, исходя из соотношений добавочной компоненты и основного потока, возможно создать систему с меньшими

энергетическими затратами их смешения и получения выкооднородной эмульсии.

Данная технология создает возможность:

- максимально снизить уровень остаточного содержания солей в нефти;
- повысить эффективность смешения нефти и воды за счет увеличения гомогенности водонефтяной эмульсии;
- снизить расход чистой воды на промывку, а также количество сточных вод производства, требующих дорогостоящей очистки;
- интенсифицировать процесс и снизить энергозатраты на промывку нефти и последующую сепарацию воды.

### 5.3. Подготовка и сжигание местного топлива (сырой нефти) в виде водотопливной эмульсии в котле ДКВР 10/13

Развитие представлений о нефти и нефтепродуктах как о нефтяных дисперсных системах [111] сопровождается расширением применения для их переработки методов интенсификации тепло- и массообменных процессов. Заметное место среди таких методов физического воздействия занимают волновая технология [1] и кавитационная обработка [15]. В [5] рассмотрены некоторые энергетические и экологические аспекты влияния волнового воздействия на свойства водомазутных эмульсий. Показано, что приготовление таких тонкодисперсных эмульсий повышает эффективность сжигания топлива, обеспечивает более полное сгорание по сравнению с исходным нефтепродуктом. В [112] отмечается возможность повышения качества углеводородных топлив (снижение вязкости, увеличение выхода светлых нефтепродуктов) при использовании многофакторного воздействия в роторном импульсном аппарате (в том числе за счет кавитационной обработки). Совершенствование технологии и более глубокая переработка нефти приводят к изменению ряда физико-химических свойств конечного продукта – мазута. В результате этих изменений, а также при транспортировке и хранении получают мазут с повышенным

содержанием влаги. Одной из проблем, связанных с оптимизацией такого топлива, является создание однородной мелкодисперсной фракции имеющейся в мазуте влаги и разрушение твердых фракций, находящихся в мазуте. Для решения этих проблем используют кавитатор – устройство для приготовления водомазутной эмульсии, применение которой в качестве топлива позволяет интенсифицировать процесс сжигания топлива, улучшить экономические и экологические характеристики и т.д. Не менее сложный комплекс вопросов возникает при изучении воздействия гидродинамических методов не только при разработке нефтяных месторождений и рассмотрении особенностей формирования остаточных нефтей, но и при оценке таких альтернативных видов топлива, как биотопливо, в том числе композиции на основе торфа, древесины, лигнина, вторичного сырья, а также таких водотопливных эмульсий как битумные эмульсии. Исследование физико-химических и теплофизических свойств таких дисперсных систем должно быть связано с идентификацией их компонентного состава. В этой связи в данной работе наряду с синхронным термическим анализом был проведен химический и элементный анализ нескольких проб нефти. В качестве объектов исследования были использованы образцы жидкого горючего топлива на основе нефти Удмуртских месторождений. В таблице 5.4 приведены данные измерений и результаты количественного химического анализа проб нефти (измерения проводили в центральной химической лаборатории ТЭЦ № 12 «Мосэнерго»).

С помощью рентгеноспектрального анализатора и CNH-анализатора (automat analiser Karlo Erba Strumentatione) проведен элементный анализ, результаты которого представлены ниже: С – 24,36-24,60%; Н – 4,25-4,64%; N – 1,73-1,79%. Al – 2,82%; Si – 16,55%; S – 1,91%; Pb – 3,37%; Cl – 2,66%; K – 2,69%; Ca – 16,01%; Ti – 0,98%; Fe – 4,86%; Cu – 0,27%; Zn – 0,47%; As – 0,03%; Br – 0,22%; Rb – 0,23%; Sr – 1,16%; Zr – 0,38%.

## Результаты химического анализа проб нефти

№ п/п	Наименование определяемого компонента	Единицы измерения	Концентрация компонента				Метод измерения (НД на нефтепродукты)
			Проба № 1	Проба № 2	Проба № 4	Проба № 5	
1.	Калорийность Q <sub>D</sub>	ккал/кг	9679	9643	9677	9686	ГОСТ 21261-91
2.	Плотность ρ	кг/м <sup>3</sup>	912,9	911,9	911,9	912,2	ГОСТ 3900-85
3.	Содержание воды w	%	0,9	1,2	1,4	0,5	ГОСТ 2477-65
4.	Содержание серы S	%	1,2	1,45	0,98	1,14	ГОСТ 3877-88
5.	Вязкость условная при 50°C	Усл.град.	1,5	1,5	1,4	1,6	ГОСТ 6258-85
6.	Вязкость условная при 70°C	Усл.град.	1,1	0,9	1,1	1,0	ГОСТ 6258-85
7.	Температура вспышки	°C	52	51	52	53	ГОСТ 4333-87
8.	Температура воспламенения	°C	62	61	63	63	ГОСТ 4333-87

Синхронный термический анализ проводили с помощью установки STA 409 PC Luxx (Netzsch, Германия). Измерения изменения массы образца в зависимости от температуры осуществляли в диапазоне от 20° до 900°C при скорости нагрева 10°/мин в динамической атмосфере сухого воздуха (расход 30 мл/мин).

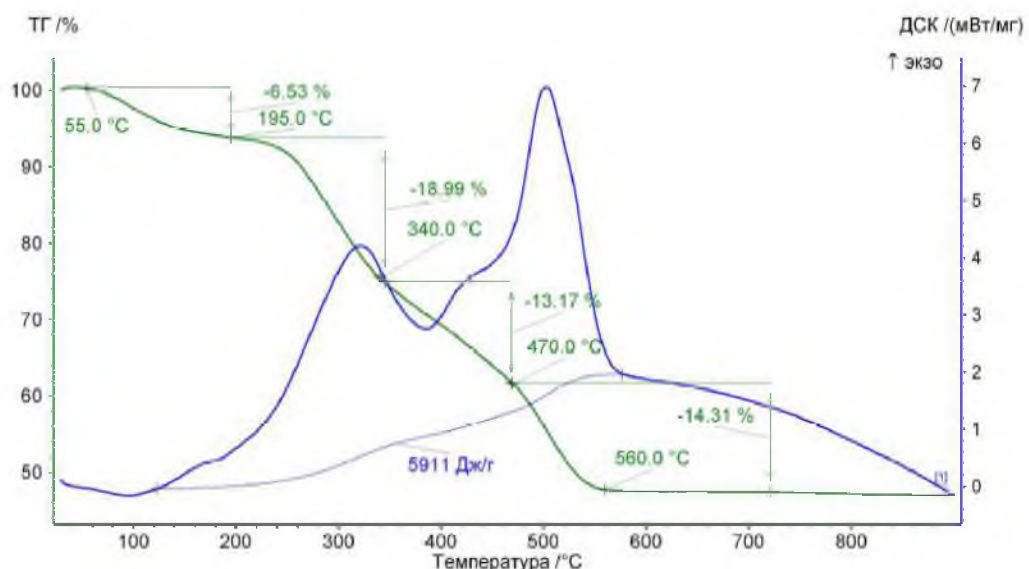


Рис. 5.3. Термогравиметрическая кривая исследуемого топлива

На рисунке 5.3 представлена соответствующая термогравиметрическая кривая, из которой видно, что процесс сгорания топлива проходит в четыре

стадии и завершается при температуре 560°C. Общая энергия тепловых эффектов процесса сгорания составляет около 6000 Дж/г.

Полученные данные термического анализа и оценки теплофизических свойств позволили провести промышленные испытания технологии подготовки к сжиганию и сжигания жидкого горючего топлива на основе нефти Удмуртских месторождений в паровом котле паросилового хозяйства п. Игра (Удмуртия). Топливо готовится к сжиганию в виде водотопливной эмульсии (рисунок 5.4), что позволяет обеспечить экономичное сжигание практически без химического недожога. Эффективность работы парового котла повышается также за счет исключения набросов факела горящего топлива на поверхность нагрева (рисунок 5.5). Положительные результаты применения проточного волнового генератора плоского типа при подготовке водонефтяной эмульсии к сжиганию отмечены актом о промышленных испытаниях, представленным в приложении 3.

Как видно из рисунков 5.4, 5.5 сжигание сырой нефти в паровом котле ДКВР-10/13 существенно зависит от ее подготовки к сжиганию.

Использование водотопливной эмульсии, полученной с помощью волновой технологии в процессе подготовки топлива, приводит к более технологичному сжиганию топлива, что было подтверждено испытаниями на котле ДКВР-10/13. Сжигание водомазутной эмульсии привело к уменьшению образования окислов азота  $\text{NO}_x$  (с 200 до 150 мг/м<sup>3</sup>), химического и механического недожога топлива в виде оксида углерода CO (с 100 до 10 мг/м<sup>3</sup>), а также дало возможность перейти к сжиганию топлива с меньшим коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$  (с 1,3 до 1,17), что привело к уменьшению потери КПД котла (с 15 до 8%). При этом повышается надежность работы энергетического оборудования, вследствие снижения параметров напряженно-деформированного состояния материала конструкции, что показывает перспективность предложенной технологии приготовления жидкого горючего топлива на основе нефти для сжигания в паросиловых установках.

При подготовке сырой нефти к сжиганию в виде водотопливной эмульсии достигается полное выгорание топлива (практически с нулевым химическим и



механическим недожогом топлива), что исключает накопление по топливному тракту в котле несгоревшего топлива и спонтанного его возгорания, приводящего к аварийным ситуациям.

Использование для сжигания локального энергетического сырья (сырой нефти) в качестве энергетического топлива в виде водотопливной эмульсии существенно снижает транспортные расходы, капитальные и эксплуатационные затраты на реализацию технического процесса сжигания топлива, вредное воздействие на природные экосистемы с обеспечением высокой надежности работы энергетического оборудования, что в итоге обеспечивает высокие технико-экономические и экологические показатели при выработке тепло- и электроэнергии.



Рис. 5.4. Структура локального энергетического сырья (сырой нефти): а) – исходный; б) – приготовленный к сжиганию в виде водотопливной эмульсии.



Рис. 5.5. Общий вид факельного сжигания нефти в топке котла ДКВР-10/12  
 а) горящий факел сырой нефти (вид через смотровой люк в топке котла) – исходный вариант; б) горящий факел той же самой нефти, но подготовленной к сжиганию в виде водотопливной эмульсии.

#### 5.4. Выводы по главе 5

Применение плоского волнового генератора проточного типа для формирования тонкодисперсных эмульсий возможно в различных отраслях промышленности без серьезных изменений технологических линий, оборудования, и капитальных вложений.

На основании проведенных исследований работы волнового генератора с реальными промышленными средами достигнуты:

1. Повышение эффективности очистки соевого нерафинированного масла с помощью единственного волнового воздействия в проточном волновом генераторе плоского типа без привлечения рафинирующих химических реагентов. Применение волнового генератора плоского типа позволило улучшить результаты технологии очистки нерафинированного соевого масла с помощью гидротации с 27,2% остаточного содержания фосфатидов для механической технологии смешения с помощью роторной мешалки до 18,8% для волновой обработки масла в генераторе с гидротированием. Оптимизация проточного канала и количества

промывочной воды приведет к дополнительному улучшению показателей очистки.

2. Необходимая степень обессоливания технологии промывки сырой нефти. При этом использовалась одностадийная промывка потока нефти меньшим количеством воды, по сравнению с технологией используемых на предприятиях НПЗ, что позволяет повысить экологичность данной технологии. Широкие возможности компоновочных решений и теплофизических параметров работы генератора дают возможность создания однородной эмульсии необходимого качества. Также при использовании смесительного устройства данного типа, исходя из соотношений добавочной компоненты и основного потока, возможно создать систему с меньшими энергетическими затратами их смешения и получения высокооднородной эмульсии.

3. Более технологичное сжигание энергетического топлива, за счет использования водотопливной эмульсии, полученной с помощью волновой технологии в процессе подготовки топлива. При этом повышается надежность работы энергетического оборудования, что показывает перспективность предложенной технологии приготовления жидкого горючего топлива на основе нефти для сжигания в паросиловых установках.

При подготовке сырой нефти к сжиганию в виде водотопливной эмульсии достигается полное выгорание топлива (практически с нулевым химическим и механическим недожогом топлива), что исключает накопление по топливному тракту в котле несгоревшего топлива и спонтанного его возгорания, приводящего к аварийным ситуациям.

Простота эксплуатации, высокая надежность и малые энергетические затраты (0,2-0,25 кВт/(т/час)) позволяют внедрить проточный волновой генератор плоского типа в существующее поточное производство без серьезных капитальных затрат.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены тонкодисперсные, высокоомогенные эмульсии из несмешивающихся сред в проточных генераторах плоского типа, реализующих эффекты и явления нелинейной волновой механики.

2. На основе анализа существующих типов смесительных устройств и имеющихся в печати экспериментальных данных по течению жидкостей вокруг тел различной формы сделан вывод о недостатке этих данных для создания эффективных проточных генераторов с целью формирования тонкодисперсных, гомогенных эмульсий из несмешивающихся сред.

3. На основе проведенных в НЦ НВМТ РАН экспериментально–расчетных исследований выбраны режимно-технологические решения проточного волнового генератора с повышенной эффективностью формирования тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся сред.

4. Разработан экспериментальный гидродинамический стенд, применены методики проведения экспериментов (визуализации кавитационных областей, измерения зарождения и развития кавитационных явлений, регистрации волновых явлений и получения дисперсионных картин формируемых эмульсий), а также получены экспериментальные данные по формированию различных режимов течения жидкости в проточном волновом генераторе плоского типа.

5. Получены экспериментальные зависимости (относительной длины кавитационной области, износа материала контрольной вставки, частоты пиков колебаний давления и уровня статических давлений в донной области) при различных гидродинамических режимах и конструктивных решениях волнового генератора, на основе которых выбраны основные диапазоны максимального кавитационного воздействия на поток жидкости.

6. Экспериментально установлено, что наличие режима интенсивного схлопывания пузырьков в рабочем канале волнового генератора приводит к дополнительному дроблению капель эмульсии. Размер частиц дисперсной фазы не превышает 10мкм, при этом около 70% частиц имеет размер не более 3 мкм.

7. Экспериментально показано, что установка участка поверхностных вихрегенераторов в виде лунок перед побудителями кавитации, приводящая к увеличению интенсивности износа материала контрольной вставки на ~15-20%, и, соответственно, к интенсификации процесса формирования эмульсий из несмешивающихся сред (увеличение количества частиц с размерами не более 3 мкм до 90%).

8. Разработаны рекомендации для создания проточных волновых генераторов плоского типа с целью формирования тонкодисперсных эмульсий из несмешивающихся сред с учетом граничных условий гидродинамических режимов, конструктивных решений и исследований динамики и износа рабочих поверхностей устройства.

9. Проведена в лабораторных и промышленных условиях апробация разработанного проточного волнового генератора, реализующего эффекты и явления нелинейной волновой механики, подтвердившая повышение эффективности формирования и применения тонкодисперсных, высокоомогенных и стабильных эмульсий из несмешивающихся сред в технологических процессах различных производств.

10. Для пищевой промышленности получены результаты повышения эффективности очистки нерафинированного растительного масла с помощью только гидратации с 27,2% остаточного содержания фосфатидов для механической технологии смешивания с помощью роторной мешалки до 18,8% для волновой обработки масла.

11. С помощью волновой технологии достигнута необходимая степень обессоливания ( $3,5 \text{ мг/дм}^3$ ) в технологии промывки сырой нефти. При этом использовалась одностадийная промывка потока нефти меньшим количеством воды, по сравнению с технологией использующейся на предприятиях НПЗ, что позволяет повысить эффективность и экологичность данной технологии.

12. Подготовка жидкого горючего топлива на основе нефти Удмуртских месторождений позволила обеспечить экономичное сжигание топлива в паровом

котле ДКВР 10/13 со снижением химического недожога в 4 раза и сохранением надежной работы энергетического оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии – М.: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. – 712 с.
2. Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П. Волновые технологии в инновационном машиностроении – М.: НИЦ «РХД», 2010. – 64 с
3. Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии (Введение в волновую технологию) – М.-Ижевск: НИЦ «РХД», 2008. – 192 с.
4. Таушер В. Технология статического смещения. //Химическое и нефтяное машиностроение. – 1996. – №3. С.26-32
5. Ганиев Р.Ф., Кормилицын В.И., Украинский Л.Е. Волновая технология приготовления альтернативных видов топлив и эффективность их сжигания.– М.: Изд-во «Наука», 2008. – 116 с.
6. Кормилицын В.И., Лысков М.Г., Румынский А.А. Комплексная экосовместимая технология сжигания водомазутной эмульсии и природного газа с добавками сбросных вод. Теплоэнергетика – 1996. – №9. – С.13-17
7. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками: Пер. с польск. – Л.:Химия, 1975. – 384 с.
8. Яруничева Д.Е. Исследование эффективности процесса перемешивания смесей с целью снижения его энергоемкости и повышения интенсификации теплообмена: [электронный ресурс] // Магистерская работа ДонНТУ. –2009. URL: <http://www.masters.donntu.edu.ua/2009/fizmet/yarunicheva/diss/index.htm>
9. Эвентов И.М. Назаров В.В. Эмульсионные машины и установки – М.Л.: Машиностроение, 1964 – 144 с.
10. Шерман Ф. Эмульсии Пер. с англ. – Л.: Химия, 1972. – 448 с.
11. Иванов А.Н., Канторович Н.А. Топливные эмульсии и суспензии – М.: Metallurgizdat, 1963. – 183 с.

12. Козырев С.П., Акчурин Р.Ю. Кавитационная изнашивающая (разрушающая) способность цилиндрической гидродинамической решетки // *Машиноведение* – 1980. – №3 – С.114-118
13. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. М.: «Машиностроение», 1971. – 240 с.
14. Ефимов А.В. К вопросу взаимозависимости кавитационной эрозии, гидравлики потока и формы обтекаемого тела // *Исследование сооружений и оборудования гидроузлов: Труды МИСИ №67* – М.: МИСИ – 1968 – С.160-173
15. Рождественский В. В. Кавитация // Ленинград: «Судостроение», 1977. – 248 с.
16. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974 – 668 с.
17. Пирсол И. Кавитация –М.:Мир, 1975 – 95 с.
18. Ковальногов А.Ф., Родионов В.П. Влияние гидростатического давления на интенсивность кавитационной эрозии // *Машиностроение*. – 1984 – №3 – С.18-20
19. Перник А.Д. Проблемы кавитации – Л.: Судостроение, 1988. – 438 с.
20. Степанов Э. Дж. Кавитационные свойства жидкостей // *Теоретические основы инженерных расчетов: Труды американского общества инженеров-механиков. Сер. А. Энергетическое машиностроение*. – 1964 – №2 – С.108
21. Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // *Вестник ТГТУ*. – 2008 – Том 14 – №4 – С.861-869
22. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии / Г.А. Кардашев. – М. : Химия, 1990. – 208 с.
23. Долинский А.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях / А.А. Долинский [и др.]. – К.: ИТТФ НАНУ, 1996. – 206 с.
24. Промтов М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества : учеб. пособие / М.А. Промтов. – М.: *Машиностроение-1*, 2004. – 136 с



25. Новицкий, Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах / Б.Г. Новицкий. – М. : Химия, 1983. – 192 с.
26. Федоткин И.М. Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. – К.: Вища шк., 1984. – 68 с.
27. Федоткин И.М. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Ч. II / И.М. Федоткин, И.С. Гулый. – Киев: ОКО, 2000. – 898 с.
28. Немчин А.Ф. Новые технологические эффекты тепломассопереноса при использовании кавитации / А.Ф. Немчин // Пром. теплотехника. – 1997. – Т. 19, № 6. – С. 39–47
29. Богданов В.В. Эффективные малообъемные смесители / В.В. Богданов, Б.И. Христофоров, Б.А. Клоцунг. – Л.: Химия, 1989. – 224 с.
30. Young F.R. Cavitation. London, U.K. : Imperial College Press, 1999. – 418 p.
31. Leighton T.G. The Acoustic bubble. – London, U.K.: Academic Press, 1994. – 240 p.
32. Маргулис М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях) : учеб. пособие для хим. и хим.-технол. специальностей вузов / М.А. Маргулис. – М.: Высшая школа, 1984. – 272 с.
33. Витенько, Т.Н. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду / Т.Н. Витенько, Я.М. Гумницкий // Химия и технология воды. – 2007. – Т. 29 – № 5. – С. 422–432
34. Тварадзе Р.В. Предварительная подготовка жидкого топлива в виде водотопливной эмульсии для использования на ТЭЦ. Мало- и безотходные технологии в энергетике как средства защиты окружающей среды и повышения эффективности топливоиспользования. Материалы Всесоюзного совещания. Ч.2 – М.: ЭНИН. – 1985 – С.108-119
35. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности,

сельском и домашнем хозяйстве / В.Н. Хмелев [и др.]. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.

36. Ультразвуковой реактор компании ООО «ТНЦ Техносоник» [Электронный ресурс] // ООО «ТНЦ Техносоник». – 2012. URL: <http://b6404.narod.ru/index.html>

37. Балабудкин, М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М.А. Балабудкин. – М. : Медицина, 1983. – 160 с.

38. Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с/

39. Синькова С.И., Пузырев С.А. Получение эмульсии с помощью ультразвукового жидкостного свистка // Коллоидный журнал, – 1957. – №3. – С.18-27

40. Патент № 2306972. МПК В01F5/00. Устройство для гомогенизации и приготовления смесей / Ганиев Р.Ф., Кормилицын В.И., Украинский Л.Е. и др. Оpubл. 27.09.2007

41. Патент № 2139467. МПК В01F3/00. Способ регенерации донных отложений мазутохранилищ и устройство для его осуществления/ Булгаков Б.Б., Булгаков А.Б. Оpubл. 10.10.1999

42. Свидетельство на полезную модель № 8631. МПК В01F5/00. Кавитатор/ Кормилицын В.И., Димов Н.В., Лысков М.Г. Оpubл. 16.12.1998

43. Патент № 5294353 США. Методы получения и применения стабильных эмульсий вода в масле. Оpubл. 15.03.1994

44. А.С. № 745050. МПК В01F3/08. Кавитационный реактор/ Акчурин Р.Ю., Козырев С.П. Оpubл. 07.08.1981

45. Зройчиков Н.А., Лысков М.Г., Булгаков А.Б., Морозова Е.А. Исследование и опыт применения водомазутных эмульсий на энергетических котлах ТГМП-314 и ТГМ-96 // Теплоэнергетика. – №6. – 2006. С.31-35

46. Волков Э.П., Кормилицын В.И., Шалобасов И.А. Исследование вращающейся цилиндрической гидродинамической решетки кавитаторов. Теплоэнергетика. – 1991. – №5. – С.21-23
47. Бэтчелор Дж.К.. Введение в динамику жидкости. – М.: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2004. – 800 с.
48. Launder B.E.. Second-Moment Closure: Present... and Future? Inter. J. Heat Fluid Flow, 10(4):282-300, 1989
49. Launder B.E., Reece G.J., Rodi W. Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure. J. Fluid Mech., 68(3):537-566, April 1975
50. Lien F.S., Leschziner M.A. Assessment of Turbulent Transport Models Including Non-Linear RNG Eddy-Viscosity Formulation and Second-Moment Closure. Computers and Fluids, 23(8):983-1004, 1994
51. Fu S., Launder B.E., Leschziner M.A. Modeling Strongly Swirling Recirculating Jet Flow with Reynolds-Stress Transport Closures. In Sixth Symposium on Turbulent Shear Flows, Toulouse, France, 1987
52. Gibson M.M., Launder B.E. Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer. J. Fluid Mech., 86:491-511, 1978
53. Launder B.E. Second-Moment Closure and Its Use in Modeling Turbulent Industrial Flows. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 9:963-985, 1989
54. Singhal A.K., Li H.Y., Athavale M.M., Jiang Y. Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model. ASME FEDSM'01, New Orleans, Louisiana, 2001
55. Чжен П. Отрывные течения. – М.: Издательство «Мир», 1972 – т.1.– 298 с.; 1973. – т.2. – 280 с.
56. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – Л./М. : Наука, 1974 – 712 с.
57. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости газа. – М.:Мир, 1986. – 184 с.
58. Жукаускас Конвективный перенос в теплообменниках. – М.:Наука, 1982. – 472 с.

59. Roshko A. Experiments on the flow past circular cylinders at a very high Reynolds number. – J. Fluid Mech., 1961, vol.10, pt.3, p.345-356
60. Дыбан Е.П. Эпик Э.Я. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизированных потоков. – Киев.: Наук. Думка, 1985. – 296 с.
61. Дыбан Е.П. Эпик Э.Я. Влияние турбулентности воздушного потока на развитие теплового пограничного слоя и интенсивность тепломассообмена на начальном участке трубы – в кн.: Тепло- и массоперенос. М.: Энергия, 1968,. –Т.1. – С 514-520
62. Дыбан Е.П. Эпик Э.Я. Микроструктура пограничных слоев и процессы переноса в них при повышенной степени турбулентности внешнего потока – в кн.: Пристенное турбулентное течение: Тр. XVIII Сиб. Теплофиз. Семинара. Новосибирск: ИТФ СО РАН СССР. – 1975. – ч.2. – С.30-42
63. Дыбан Е.П. Эпик Э.Я. Определение длины пути смешения при турбулентном течении в трубах и пограничных слоях по измеряемым в опытах характеристикам турбулентности. // Теплофизика и теплотехника. – 1978. – вып.21. – С.22-27
64. Еронин М.В. Дунай О.В., Кратиров Д.В., Михеев Н.И., Молочников В.М. Вихри Кармана за плохообтекаемым телом в ограниченном турбулизированном потоке и при турбулизации пограничного слоя на теле // Изв. РАН. МЖГ. – 2010. – №4. – С.97-106
65. Акылбаев Ж.С. Исследование влияния загромождения потока на гидродинамику и теплообмен круглого цилиндра: Автореф. дис. ... канд. физ-мат. наук. – Алма-ата, 1969. – 21 с.
66. Чжен П. Управление отрывом потока. – М.: Мир, 1979. – 552 с.
67. Горлин С.М. Экспериментальная аэродинамика. – М.: Высшая школа, 1970. – 424 с.
68. Петров К.П. Аэродинамика тел простейших форм. – М.: Изд-во «Факториал», 1988. – 432 с.

69. Акылбаев Ж.С., Исатаев С.И. Пользик В.В. Срыв вихрей с поверхности плохообтекаемых тел и его влияние на теплообмен – в кн.: Тепло- и массоперенос. Минск. – 1972. – т.1. – ч.1 – С.291-295
70. Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые измерительные приборы. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
71. Buresti G., Lanciotti A. Vortex shedding from smooth and roughened cylinders in cross-flow near plane surface // *Aeronautical quarterly*, vol.30, 1979, p. 305-321
72. Ангрилли, Бергамски, Коссалтер. Исследование изменений процесса срыва вихрей с круглого цилиндра, обусловленных влиянием стенки. // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. – т.104. – №4. – С.189-194
73. Езерский А.Б. О пульсациях давления на жесткой стенке, вызванных вихревой дорожкой // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1986. – №2. – С.167-169
74. Козлов А.П., Кратиров Д.В., Михеев Н.И., Молочников В.М. процесс вихреобразования при поперечном обтекании пластины в ограниченном турбулентном потоке // *Теплофизика и аэромеханика*. – 1998. – т.5. – №4. – С.593-596
75. Козлов А.П., Кратиров Д.В., Михеев Н.И., Молочников В.М. Структура течения вблизи поперечно обтекаемого кругового цилиндра в ограниченном турбулентном потоке с неравномерным профилем скорости // *Теплофизика и аэромеханика*. – 1998. – т.5. – №2 – С.161-166
76. Козлов А.П., Михеев Н.И., Молочников В.М. Картина формирования крупномасштабных вихрей за плохообтекаемым телом переменного сечения // *Теплофизика и аэромеханика*. – 1998. – т.5. – №4. – С.511-517
77. Волков Э.П., Кормилицын В.И., Шалобасов И.А. Исследование вращающейся цилиндрической гидродинамической решетки кавитаторов. *Теплоэнергетика*. – 1991. – №5. – С.21-23
78. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник // МЭИ, 2006. – 163 с.

79. Шальнев К.К. Условия интенсивности кавитационной эрозии // Изв. АН СССР. ОТН. – 1956. – №1. – С.5-12
80. Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермьяков Б.А. Теплогенерирующие установки. – М.: Стройиздат, 1986. – 559 с.
81. Шмырков О.В., Юшков Н.Б., Кормилицын В.И. Исследования характеристик плоского волнового генератора проточного типа с различными телами обтекания // М.: Инженерный журнал. Справочник. – 2013. – №2. – С.12-19
82. Юшков Н.Б., Кормилицын В.И. Повышение экономичности эксплуатации пылеугольного парового котла при пусках и подсветке факела водотопливной эмульсией // Труды Шестнадцатой Международной научно-технической конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: сб. тез. док./ Москва МЭИ. – 2010.– Т.3. – С.538
83. Юшков Н.Б. Экспериментальные исследования влияния гидродинамических характеристик потока на кавитационный износ поверхности проточного канала. Тезисы доклада. Всероссийская научная школа молодых ученых «Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил»: сб. тез. док./ Москва РАН. – 2010. – С.103-104
84. Кормилицын В.И., Ганиев С.Р., Чередов В.В., Юшков Н.Б. Влияние частоты срыва вихрей при обтекании турбулизаторов на формирование кавитационных процессов // Тезисы докладов. Труды Четвертой Международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках»: сб. тез. док./ Москва МЭИ. – 2011. – С.304
85. Н.Б. Юшков, О.В. Шмырков, В.И. Кормилицын Исследования интенсивности протекания кавитационных процессов в плоском генераторе проточного типа с различными телами обтекания // Наука и технологии. Труды XXXII Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий. – Миасс: МСНТ. – 2012. – С.104-107
86. Н.Б. Юшков, О.В. Шмырков, В.И. Кормилицын Результаты исследования течения жидкости в плоском профилированном канале с

различными телами обтекания // Итоги диссертационных исследований. Труды IV Всероссийского конкурса молодых ученых. – Миасс: МСНТ. – 2012. – С.11-20

87. В.И. Кормилицын, Л.Е. Украинский, И.Г. Устенко, В.В. Чередов. Н.Б. Юшков. Разработка фундаментальных основ конструкций аппаратов проточного типа, реализующих эффекты нелинейной волновой механики, для получения высокодисперсных эмульсий, высокостабильных жидких смесей // Международная научная конференция «Колебания и волны в механических системах»: сб. тез. док./ Москва ИМАШ РАН. – 2012. – С.28

88. Кормилицын В.И. Разработка методов улучшения экологических характеристик тепловых электростанций при сжигании природного газа и мазута в паровых котлах : дис. ... д-ра техн. наук : 0305 / Кормилицын Владимир Ильич. – М., 1992. – 627 с.

89. Wheeler W.H. Indentation of metals by cavitation, Trans, ASME. Series D, 82, N1, 1960, 184-194

90. Harrison M., Experimental study of single bubble cavitation noise, J. Acoust. Soc. Amer., 24, 1952. 776

91. Brunton I.H. The Deformation of Solids by Cavitation and Drop Impingement, Установившееся течение воды с большими скоростями, Труды Международного симпозиума в Ленинграде // М.: Изд-во Наука, 1973

92. Сиротюк М.Г. Акустическая кавитация // РАН; отв. ред. В. А. Акуличев, Л. Р. Гаврилов. - М.: Наука, 2008. – 271 с.

93. Пилипенко В.В. Кавитационные автоколебания – К.: Наук. думка, 1989. – 316 с.

94. Крамченков Е.М., Губарев В.Я., Стерлигов В.А., Урбанович Л.И., Ермаков О.Н. Эффект запирающего расхода в трубе Вентури // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Издательство МЭИ. – 2006. – Т.5. – С.262-264

95. Исаев С.А. Леонтьев А.И. Интенсификация теплообмена поверхностными вихрегенераторами (лунками). Состояние и перспективы. Труды

Четвертой Международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». – М.: МЭИ. – 2011. – С.79

96. Юшков Н.Б., Шмырков О.В., Кормилицын В.И. Формирование тонкодисперсных эмульсий в проточном волновом генераторе с маслами различной вязкости // Проблемы машиностроения и надежности машин – М.: Наука. – 2013. – №4. – С.83-87

97. НИР Исследование кавитационных явления в многофазных системах в волновых полях, № 01.2.00 901712. М.: НЦ НВМТ РАН, 2012. – 240 с.

98. Роторно-импульсный аппарат РИА: [электронный ресурс] // ООО Амальтеа сервис. URL: <http://dewa.ru/products/cavitator-ria/>

99. Роторные аппараты физико-химических процессов: [электронный ресурс] // ООО Сберегающие технологии, 2007. URL: <http://www.est-m.ru/catalog.php>

100. Диспергаторы УЗГ: [электронный ресурс] // Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева. URL: <http://rao.akin.ru/>

101. КЭМ кавитатор-эмульгатор мазута: [электронный ресурс] // НПО Транссоник, 1994-2013. URL: <http://www.energo-transsonic.ru/products/kem>

102. UIP10000 – High power ultrasonic clusters: [электронный ресурс] // Hielscher, ultrasound technology, 1999-2013. URL: [http://www.hielscher.com/ui10000\\_p.htm](http://www.hielscher.com/ui10000_p.htm)

103. Гомогенизатор топлива модели TRGA: [электронный ресурс] // afeulsystems. URL: <http://www.afuelsystems.com/ru/models-ru.html>

104. Кормилицын В.И., Фомин В.Н., Малюкова Е.Б., Бобылев А.П., Шаталова Т.Б., Аверьянов А.П., Юшков Н.Б. Подготовка к сжиганию и сжигание местного сырья (сырой нефти) в паровом котле ДКВР-10/13. Химическая технология – М.: НиТ. – 2013. – Т.4. – №11. – С.679-681

105. В.И. Кормилицын, О.В. Шмырков, Н.Б. Юшков. Формирование водотопливной эмульсии на основе сырой нефти и ее сжигание в котле ДКВР-10/13. Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ М.: Изд-во АКВА-ТЕРМ. –2013. – №4(19). – С.16-18



106. В.И. Кормилицын, С.Р. Ганиев, А.В. Бакурский, С.В. Лосев, Н.Б. Юшков. Перспективность волновой технологии приготовления энергетических топлив // Международная научная конференция «Колебания и волны в механических системах», Москва, 27-29 ноября 2012 г.: Тезисы докладов, с. 43

107. Юшков Н.Б., Кормилицын В.И., Ганиев С.Р. Волновая технология повышения надежности и экологичности работы энергетических установок // Девятнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: сб. тез. док./ Москва МЭИ. – 2013.– Т.4. – С.91

108. И.Г. Устенко, Н.Б. Юшков. Волновая технология очистки, рафинации и депарафинации растительных масел // Международная научная конференция «Колебания и волны в механических системах»»: сб. тез. док./ Москва ИМАШ РАН. – 2012. – С.28-29

109. R.Gordon, I.Gorodnitsky, V.Grishko “Method for cavitation-assisted refining, degumming and dewaxing of oil and fat”, US Patent Application Publication No.: US2009/0314688A1, 2009 г.

110. Левченко Д.И. и др. Технология обессоливания нефтей на нефтеперерабатывающих предприятиях. - М: Химия, 1985. – 168 с.

111. Туманян Б.П. Научные и прикладные аспекты теории нефтяных дисперсных систем. М., Изд-во «Техника», 2000. – 336 с.

112. Промтов М.А. Кавитационная технология улучшения качества углеводородных топлив. Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 2. – С.6-8

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

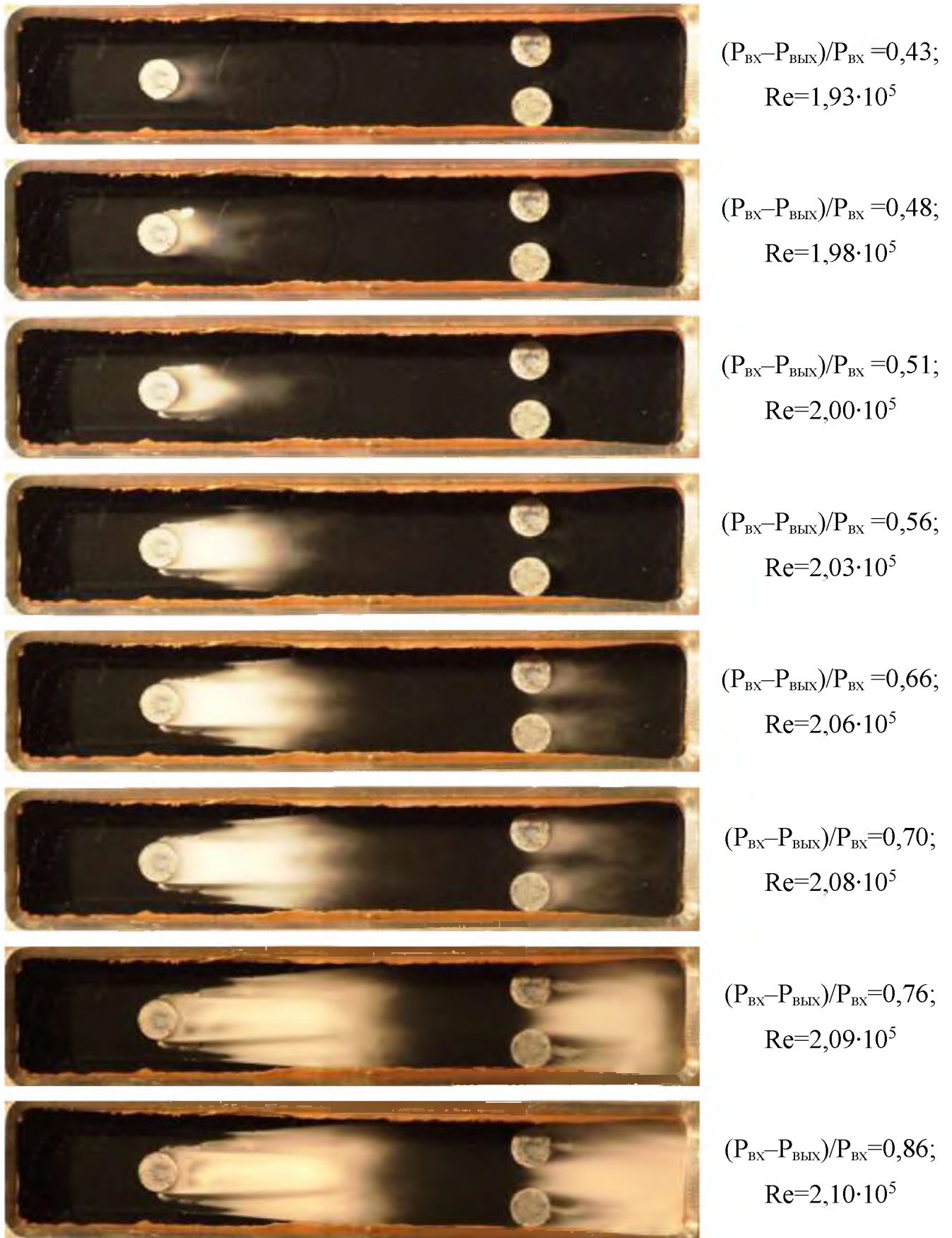


Рис. 1. Фрагменты картин течения в канале генератора с телом обтекания – цилиндр, расположенным в два ряда при  $P_{\text{BX}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$

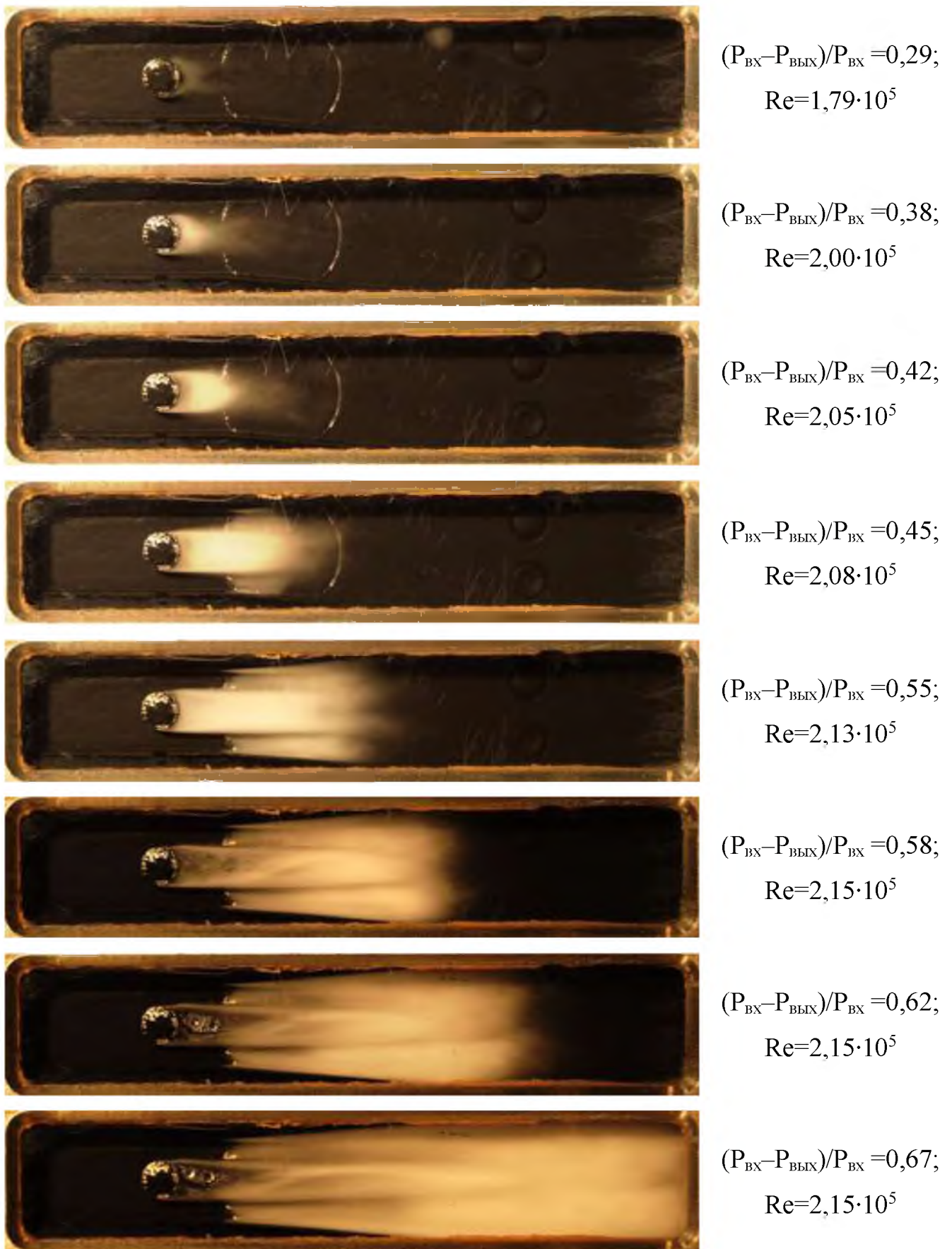


Рис. 2. Фрагменты картин течения в канале генератора с телом обтекания – цилиндр, расположенным в один ряд при  $P_{\text{BX}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$



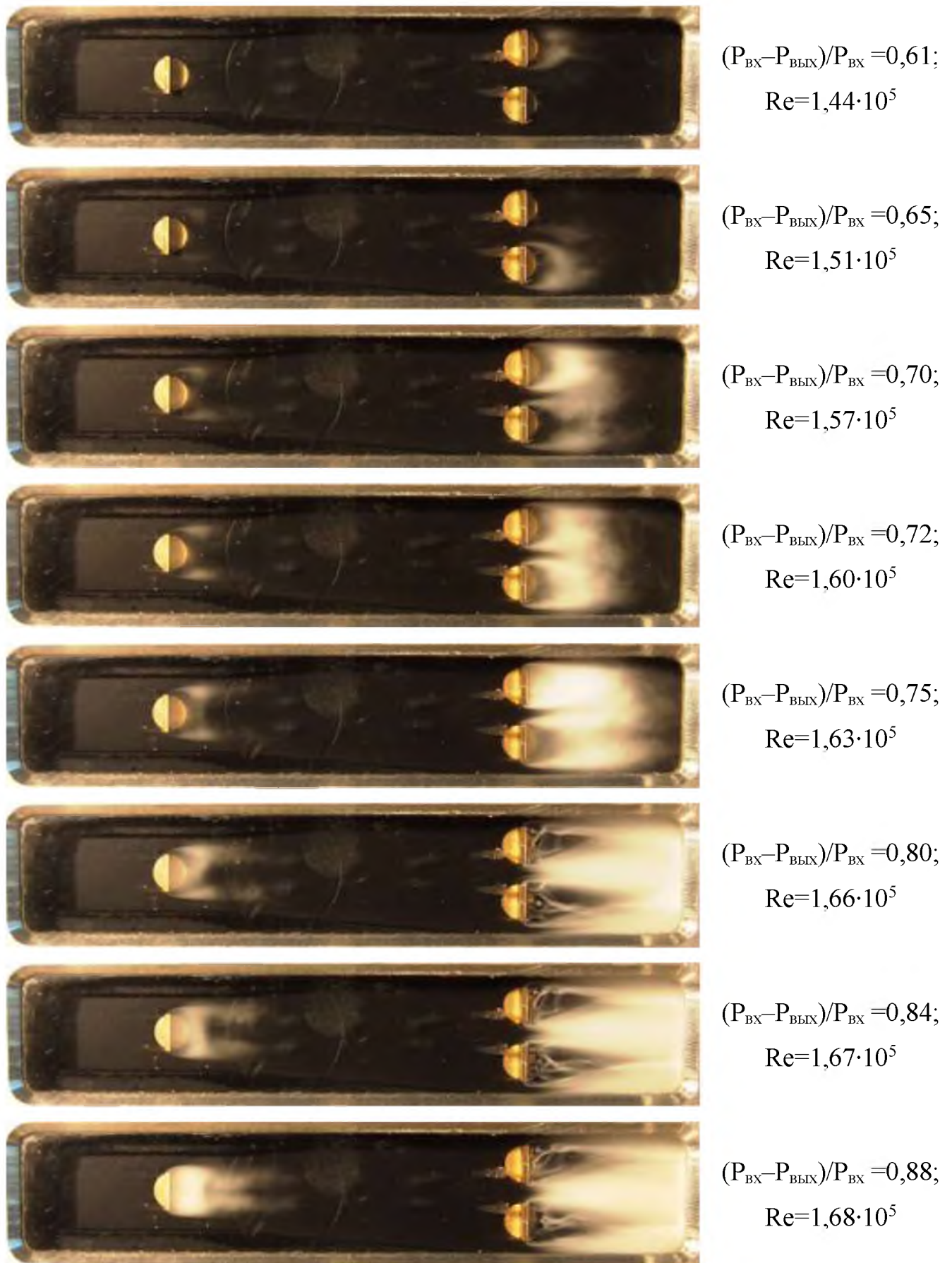


Рис. 3. Фрагменты картин течения в канале генератора с телом обтекания – пластина, расположенным в два ряда при  $P_{\text{BX}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$

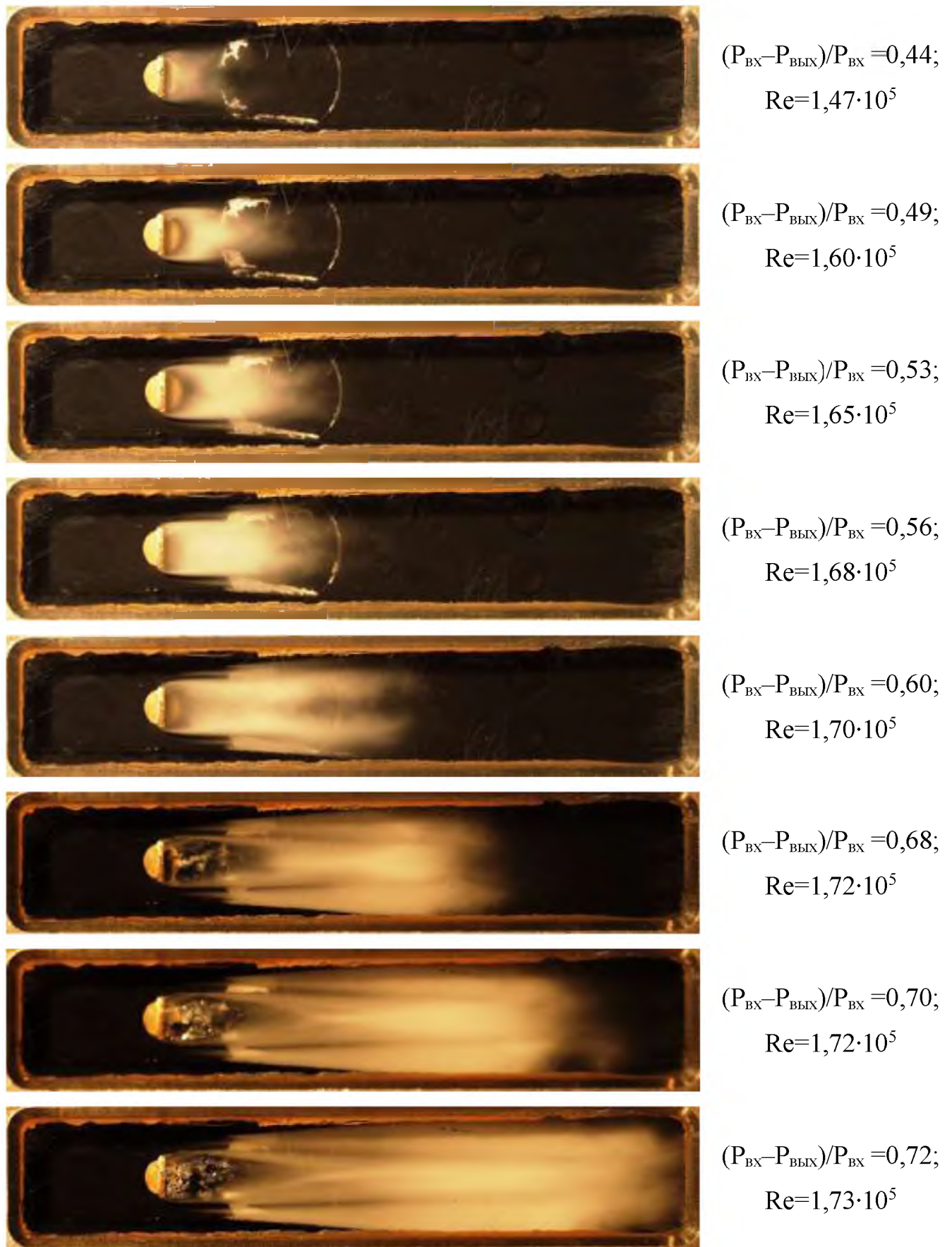


Рис. 4. Фрагменты картин течения в канале генератора с телом обтекания – пластина, расположенным в один ряд при  $P_{\text{BX}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$



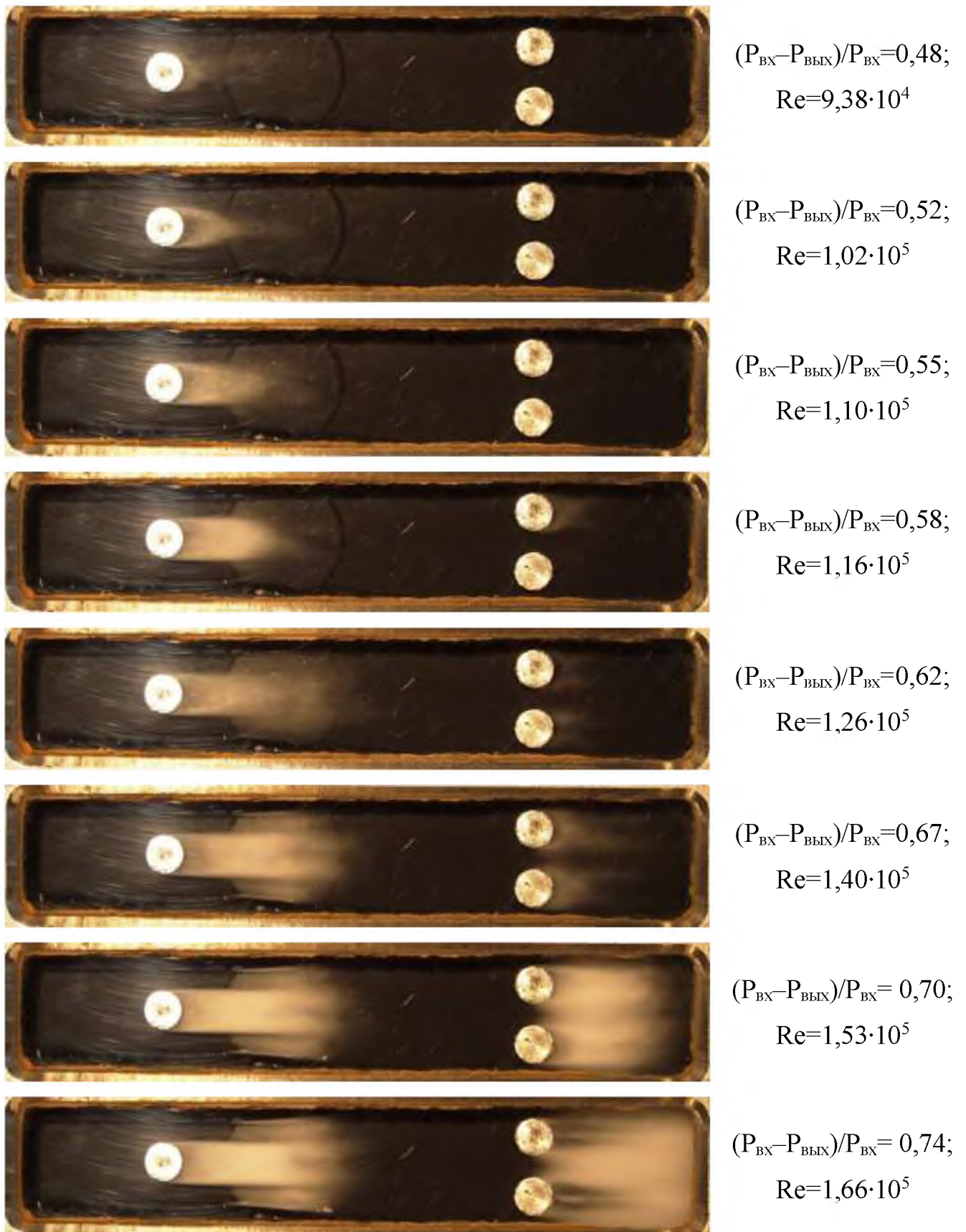


Рис. 5. Фрагменты картин течения в канале генератора с телом обтекания – цилиндр, расположенным в два ряда при  $P_{\text{BX}} = \text{var}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$

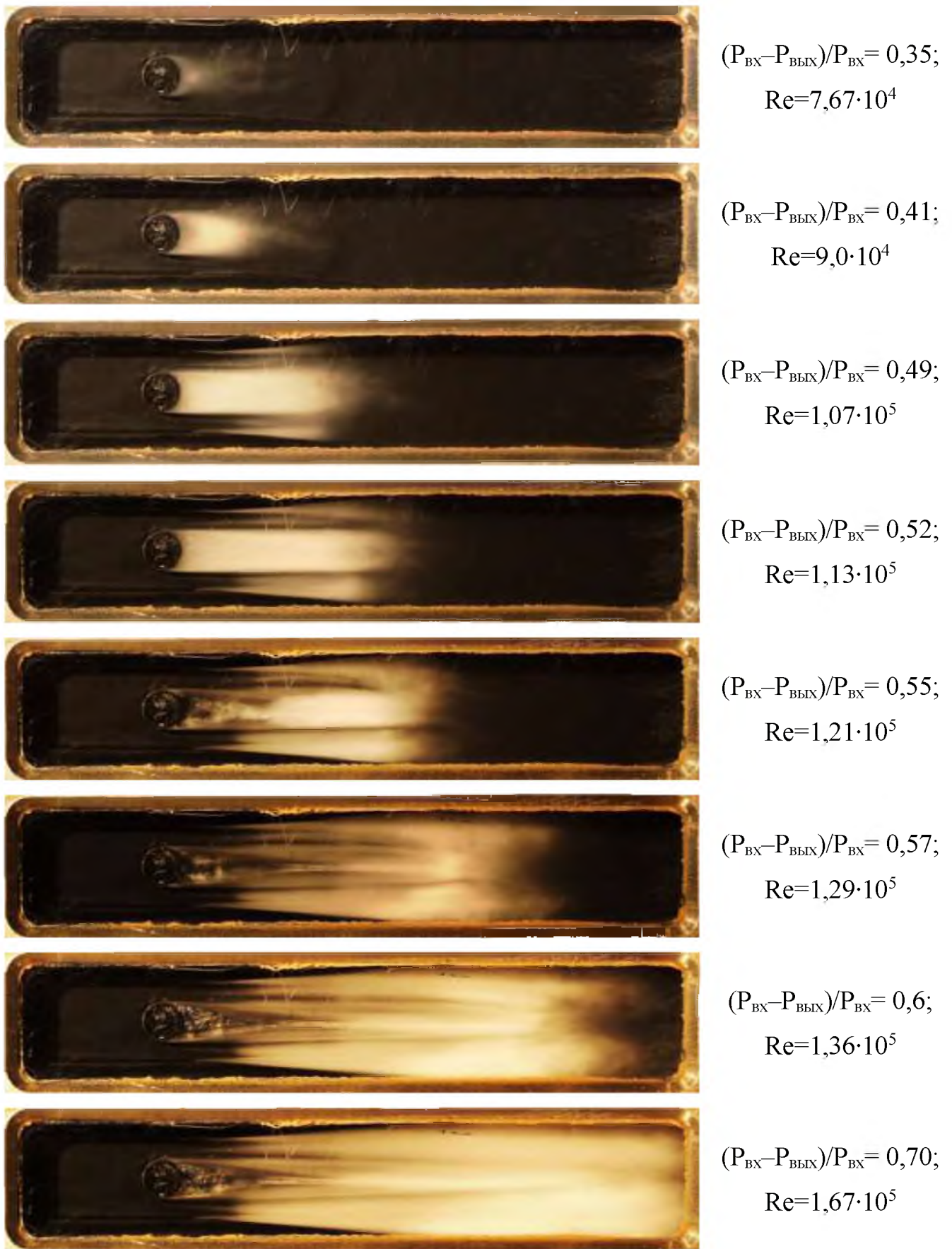


Рис. 6. Фрагменты картин течения в канале генератора с телом обтекания – цилиндр, расположенным в один ряд при  $P_{\text{ВХ}} = \text{var}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$



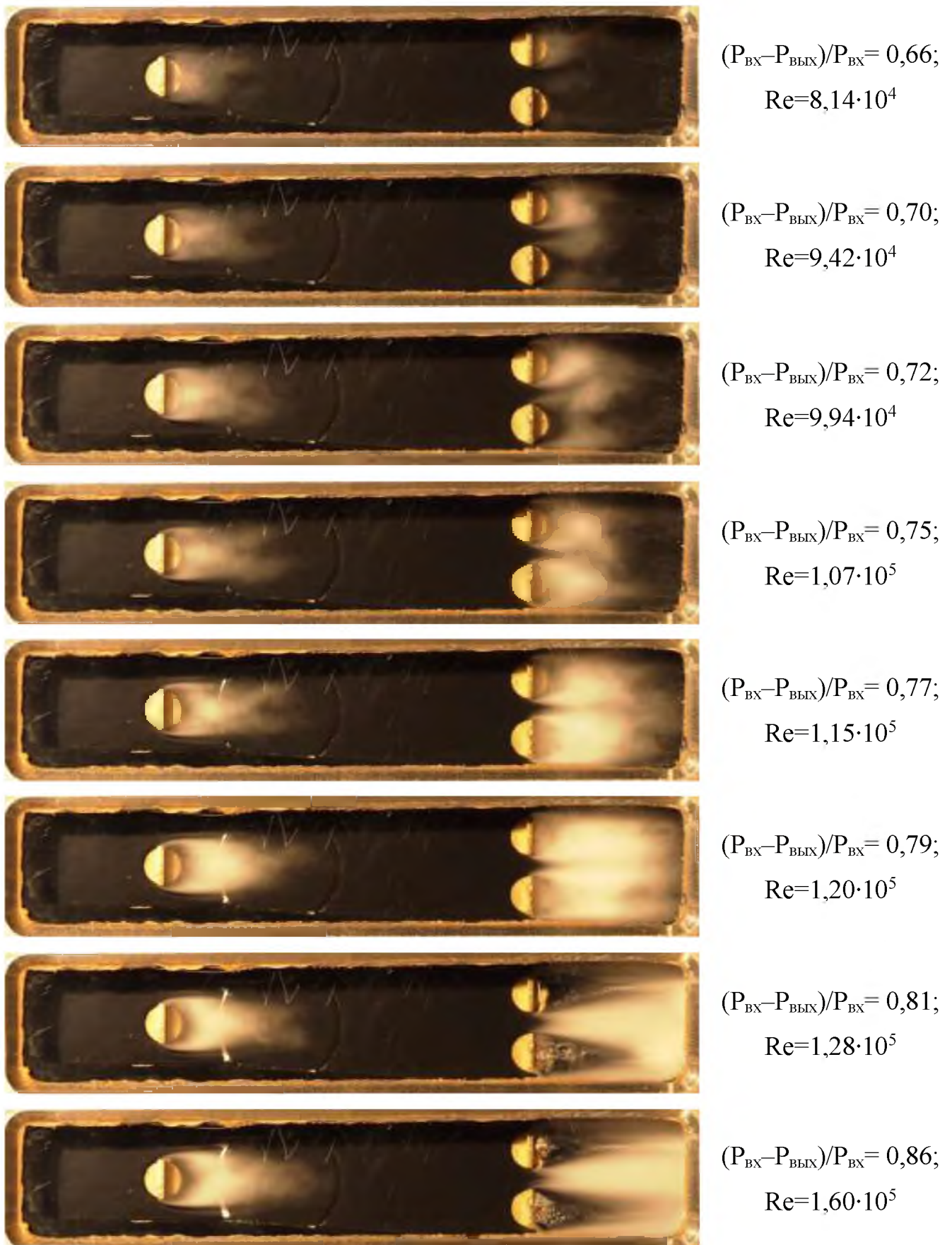


Рис. 7. Фрагменты картин течения в канале генератора с телом обтекания – пластина, расположенным в два ряда при  $P_{\text{BX}} = \text{var}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$





Рис. 8. Фрагменты картин течения в канале генератора с телом обтекания – пластина, расположенным в один ряд при  $P_{\text{BX}} = \text{var}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$

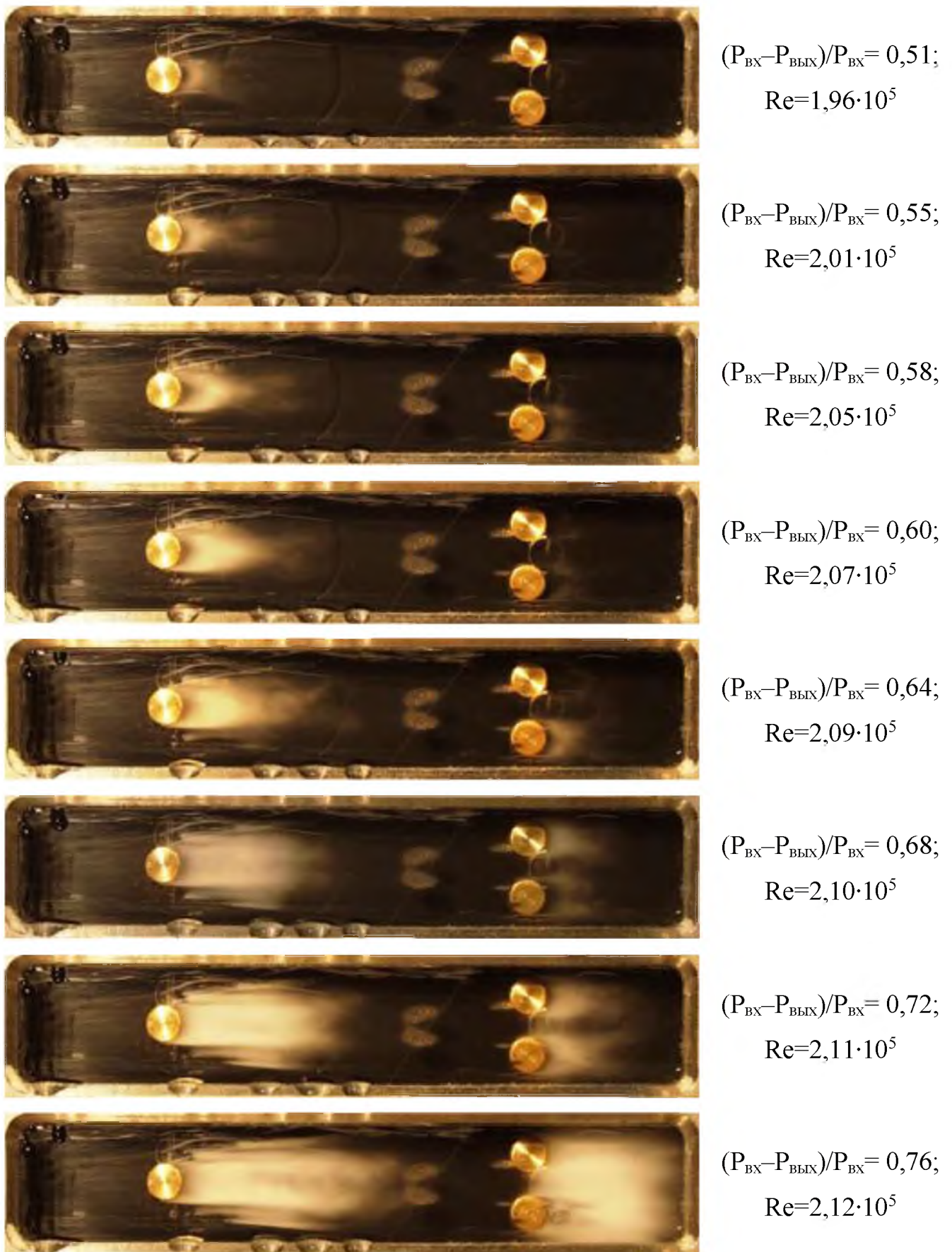


Рис. 9. Фрагменты картин течения в канале генератора с телом обтекания – цилиндр с насечкой, расположенным в два ряда при  $P_{BX}=\text{const}$ ,  $P_{BLIX}=\text{var}$



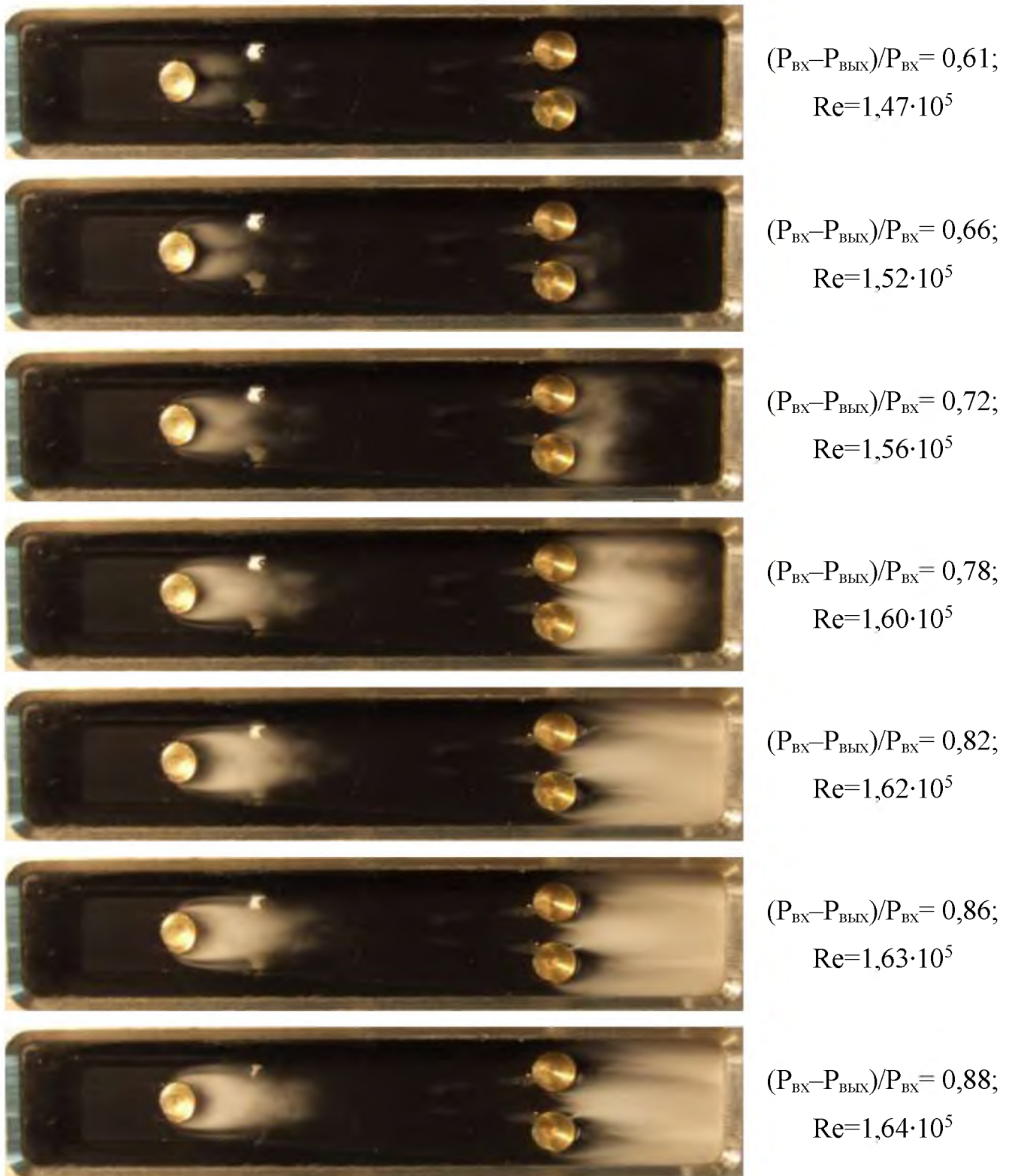


Рис. 10. Фрагменты картин течения в канале генератора с телом обтекания – серп, расположенным в два ряда при  $P_{\text{BX}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$



$$\begin{aligned} (P_{\text{BX}} - P_{\text{ВЫХ}}) / P_{\text{BX}} &= 0,62; \\ \text{Re} &= 1,70 \cdot 10^5 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} (P_{\text{BX}} - P_{\text{ВЫХ}}) / P_{\text{BX}} &= 0,68; \\ \text{Re} &= 1,71 \cdot 10^5 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} (P_{\text{BX}} - P_{\text{ВЫХ}}) / P_{\text{BX}} &= 0,72; \\ \text{Re} &= 1,72 \cdot 10^5 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} (P_{\text{BX}} - P_{\text{ВЫХ}}) / P_{\text{BX}} &= 0,76; \\ \text{Re} &= 1,73 \cdot 10^5 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} (P_{\text{BX}} - P_{\text{ВЫХ}}) / P_{\text{BX}} &= 0,80; \\ \text{Re} &= 1,74 \cdot 10^5 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} (P_{\text{BX}} - P_{\text{ВЫХ}}) / P_{\text{BX}} &= 0,84; \\ \text{Re} &= 1,75 \cdot 10^5 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} (P_{\text{BX}} - P_{\text{ВЫХ}}) / P_{\text{BX}} &= 0,86; \\ \text{Re} &= 1,75 \cdot 10^5 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} (P_{\text{BX}} - P_{\text{ВЫХ}}) / P_{\text{BX}} &= 0,88; \\ \text{Re} &= 1,75 \cdot 10^5 \end{aligned}$$

Рис. 11. Фотографии картин течения в канале генератора с телом обтекания – стакан, расположенным в два ряда при  $P_{\text{BX}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

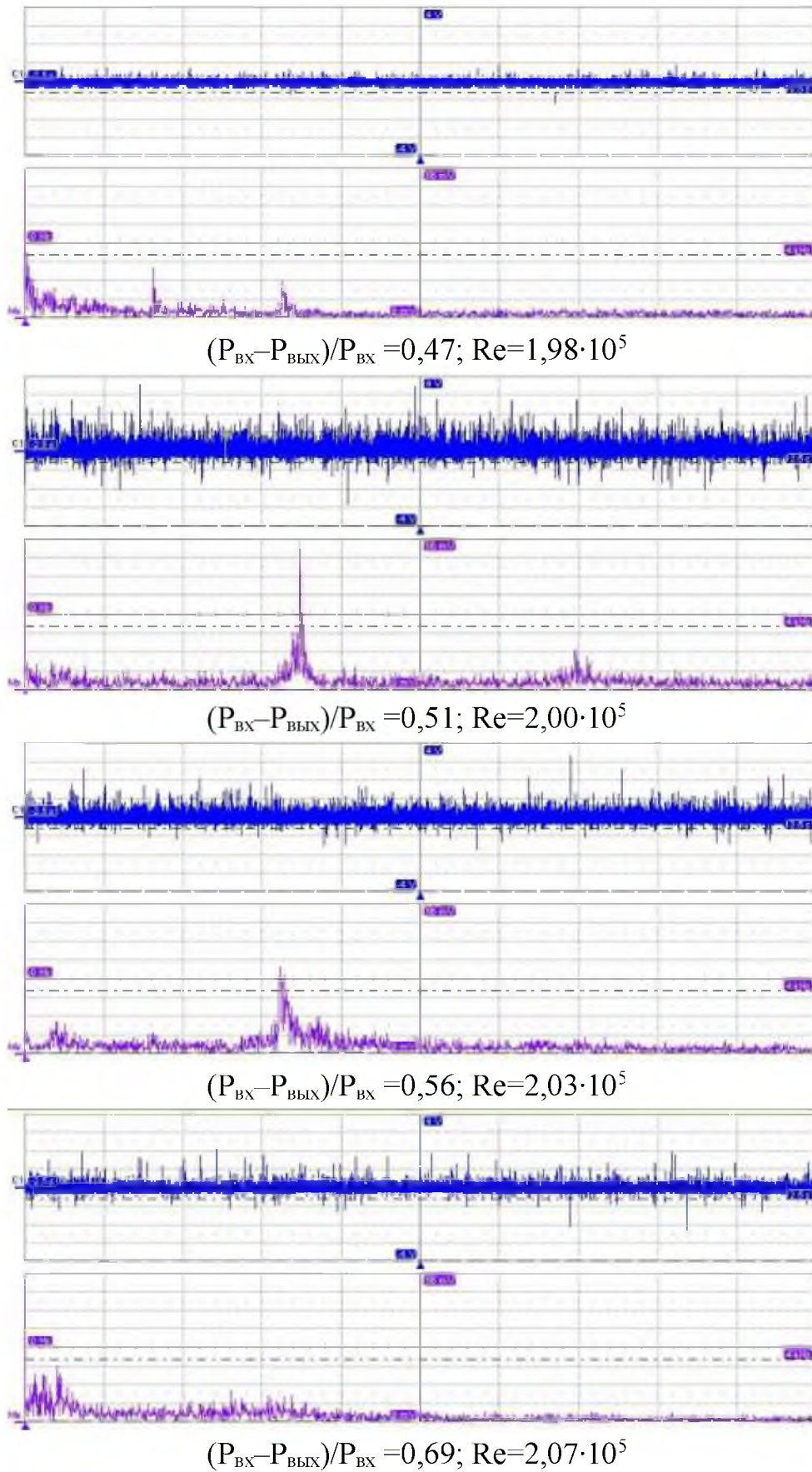


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика за телом обтекания – цилиндр, расположенным в два ряда при  $P_{\text{BX}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$

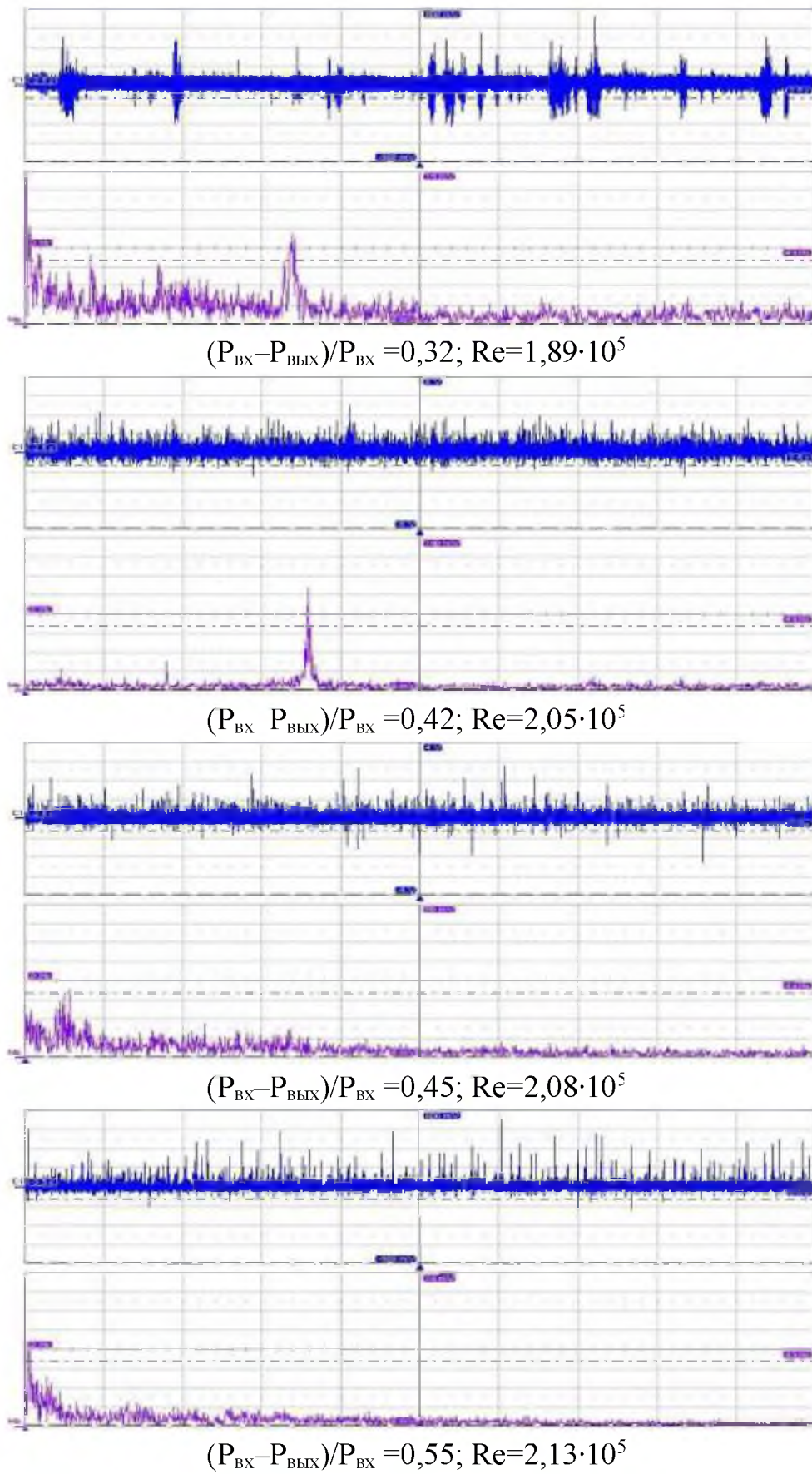


Рис.2. Амплитудно-частотная характеристика за телом обтекания – цилиндр, расположенным в один ряд при  $P_{BX} = \text{const}$ ,  $P_{BYX} = \text{var}$



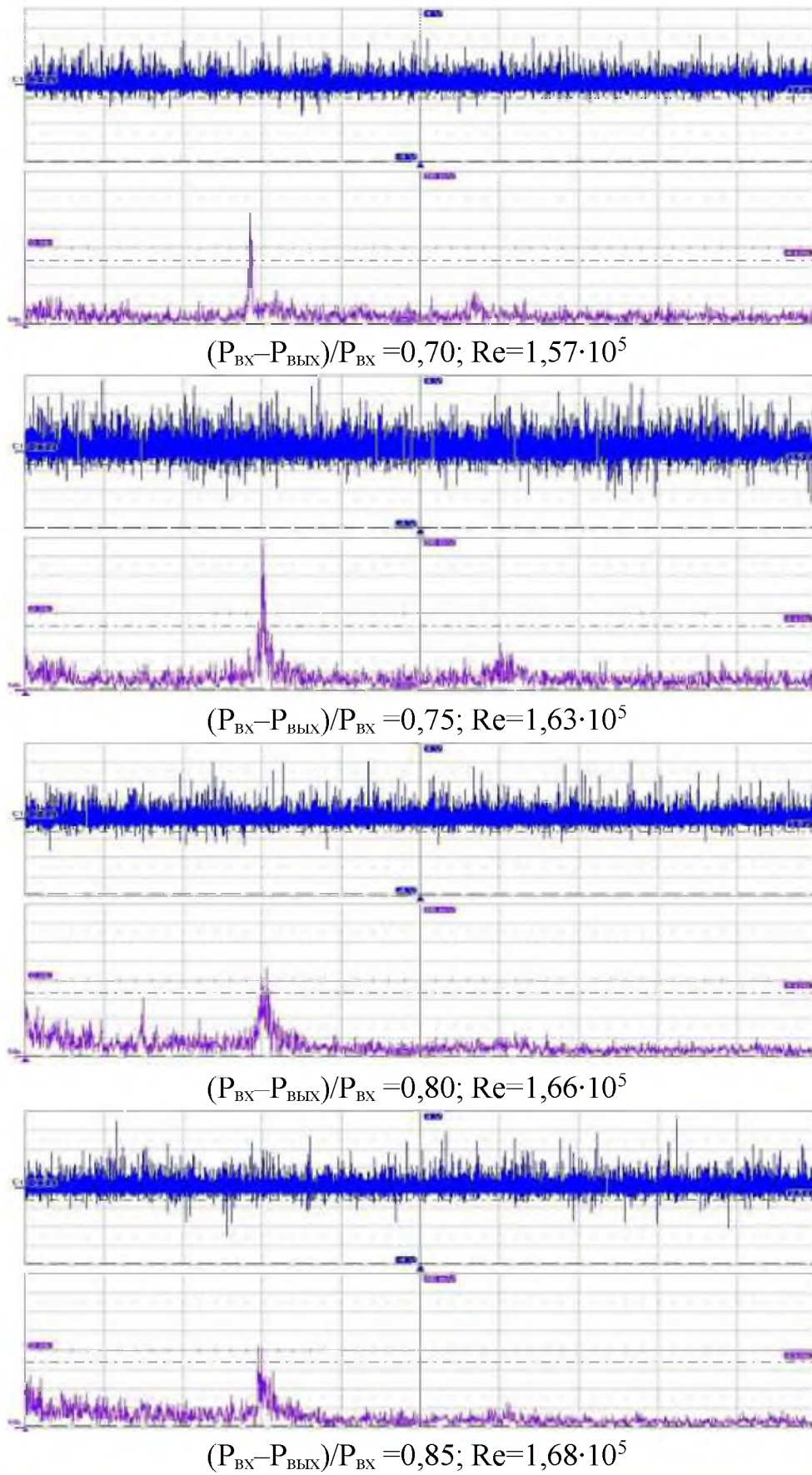


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика за телом обтекания – пластина, расположенным в два ряда при  $P_{BX} = \text{const}$ ,  $P_{BYX} = \text{var}$

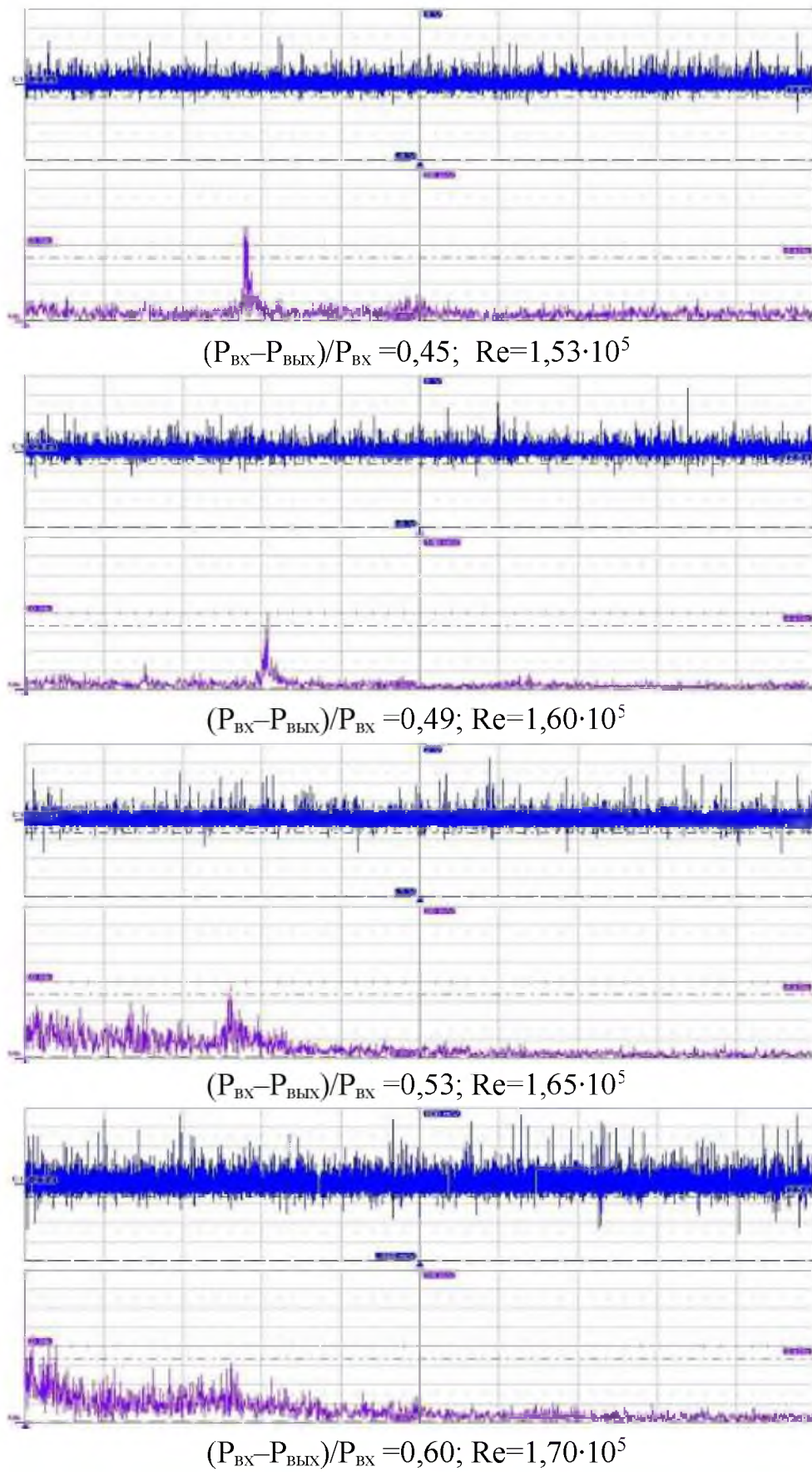


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика за телом обтекания – пластина, расположенным в один ряд при  $P_{\text{BX}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$



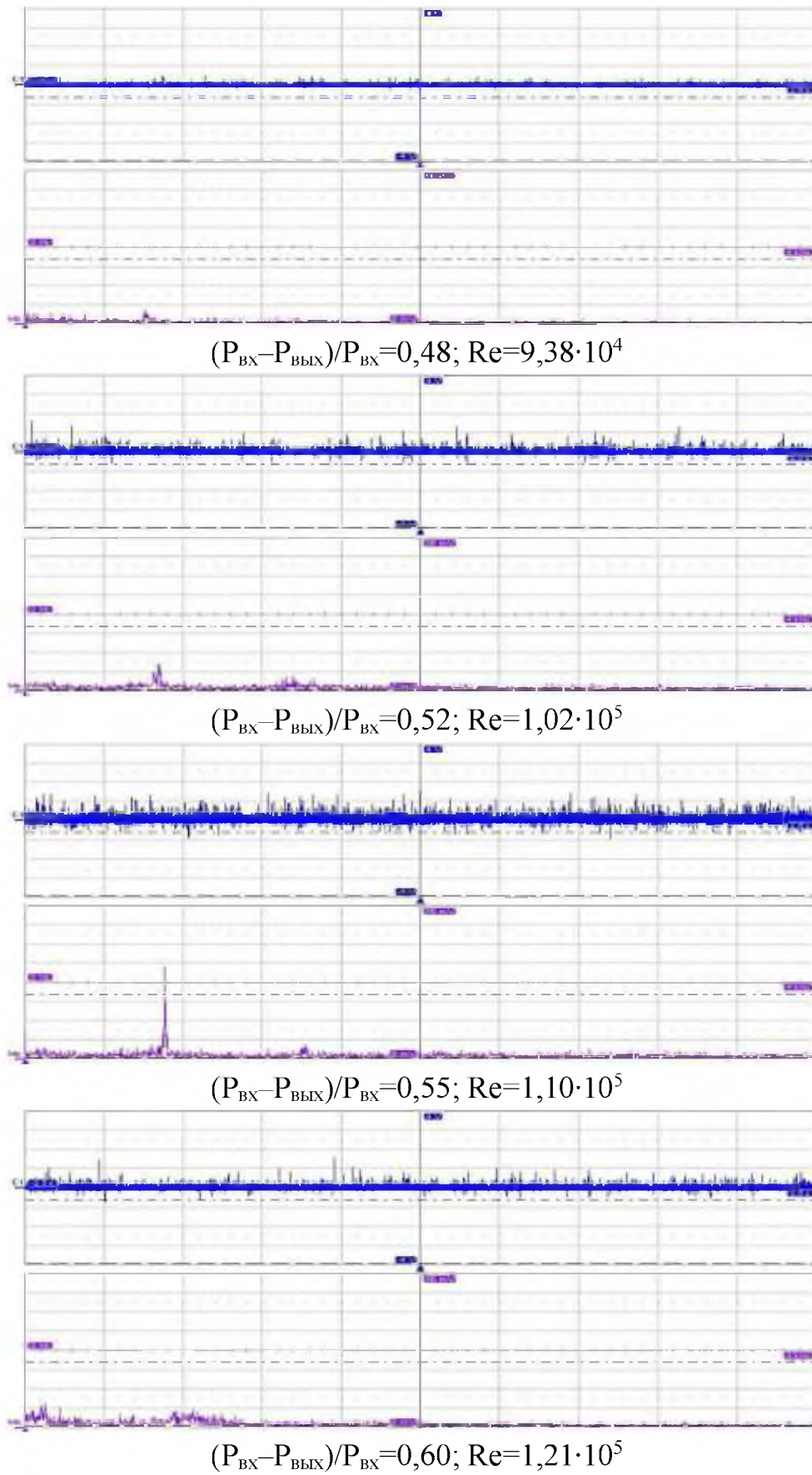


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика за телом обтекания – цилиндр, расположенным в два ряда при  $P_{\text{BX}} = \text{var}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{const}$

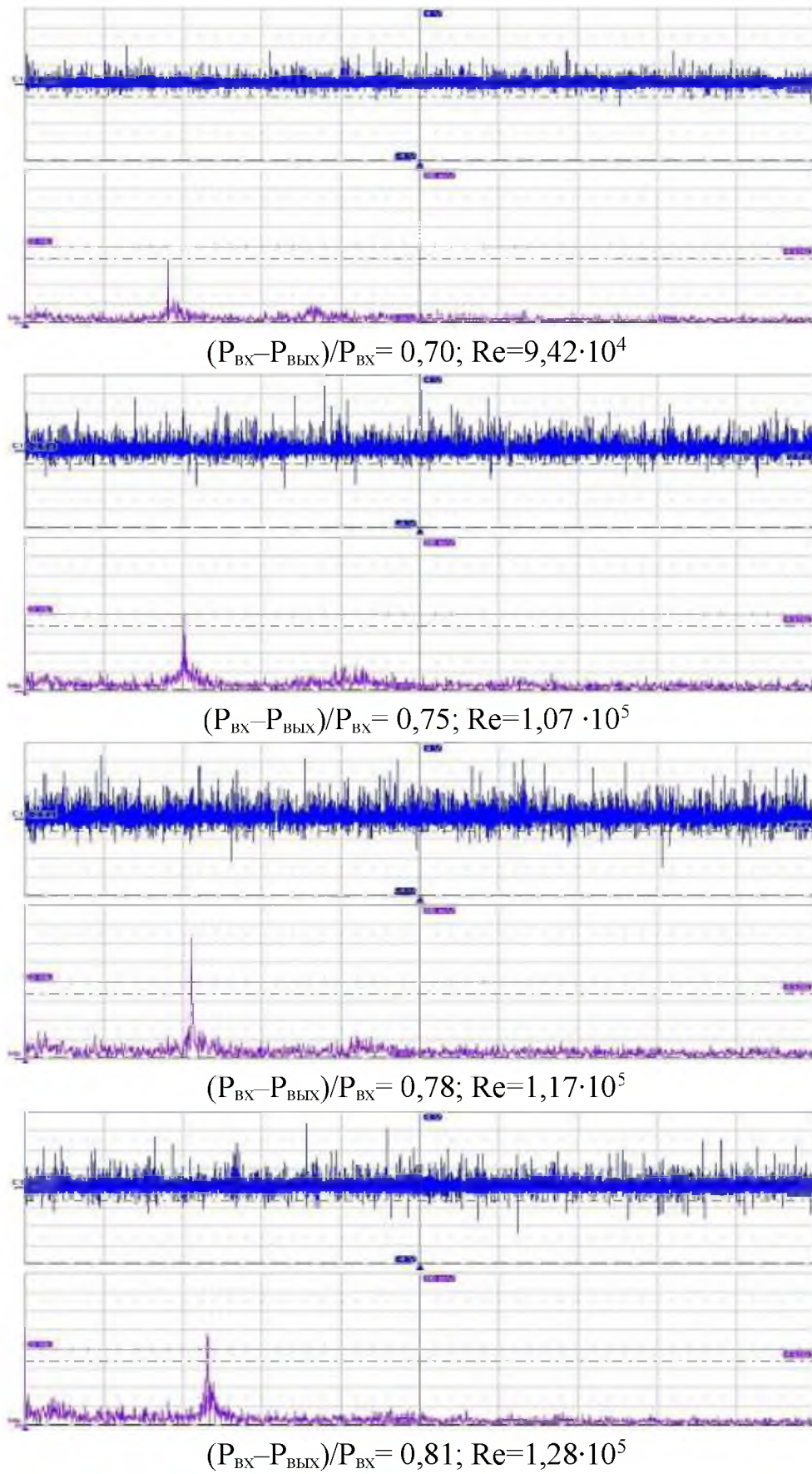


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика за телом обтекания – пластина, расположенным в два ряда при  $P_{BX} = \text{var}$ ,  $P_{BYX} = \text{const}$



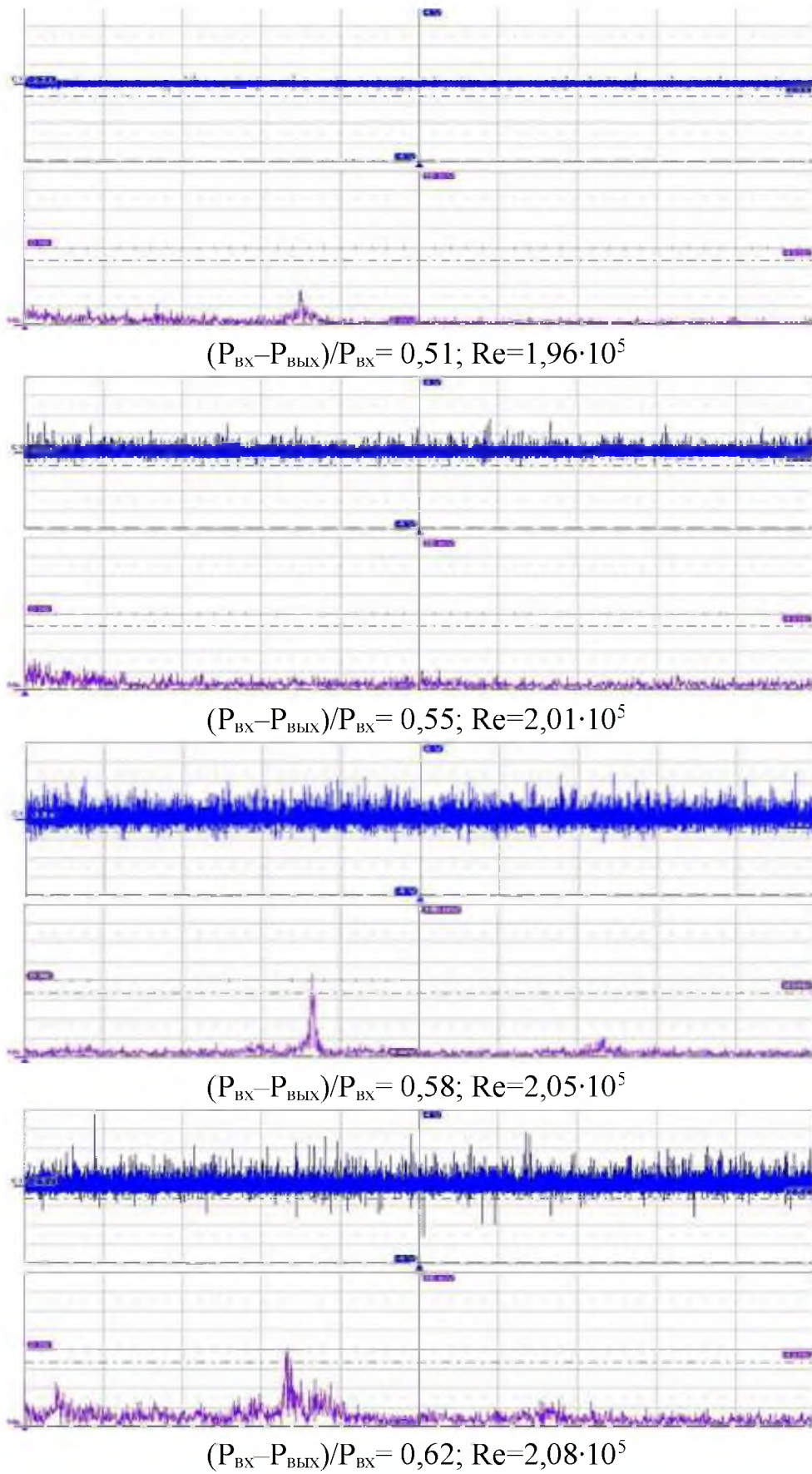


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика за телом обтекания – цилиндр с насечкой, расположенным в два ряда при  $P_{\text{BX}} = \text{const}$ ,  $P_{\text{ВЫХ}} = \text{var}$

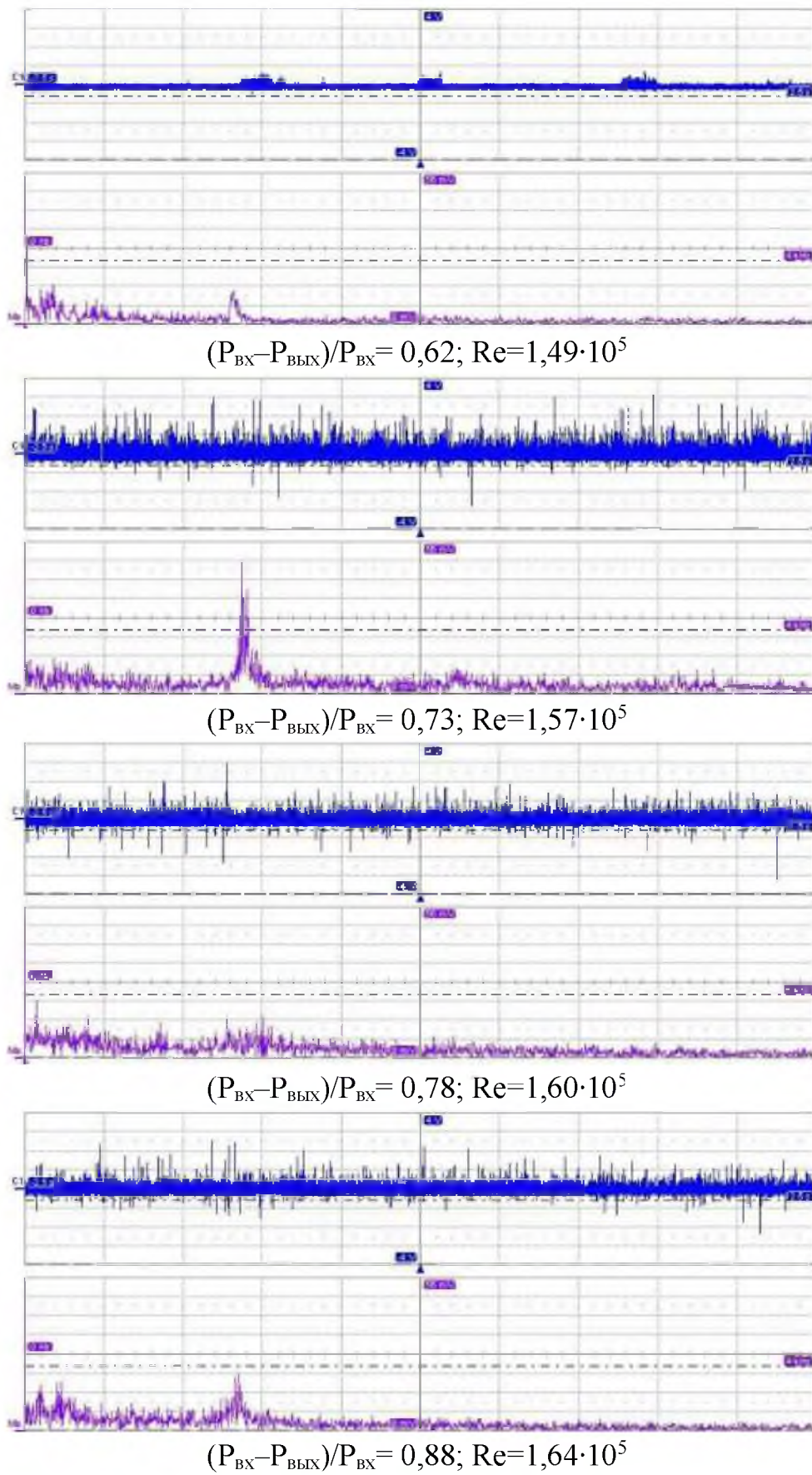


Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика за телом обтекания – серп, расположенным в два ряда при  $P_{BX} = \text{const}$ ,  $P_{BYX} = \text{var}$



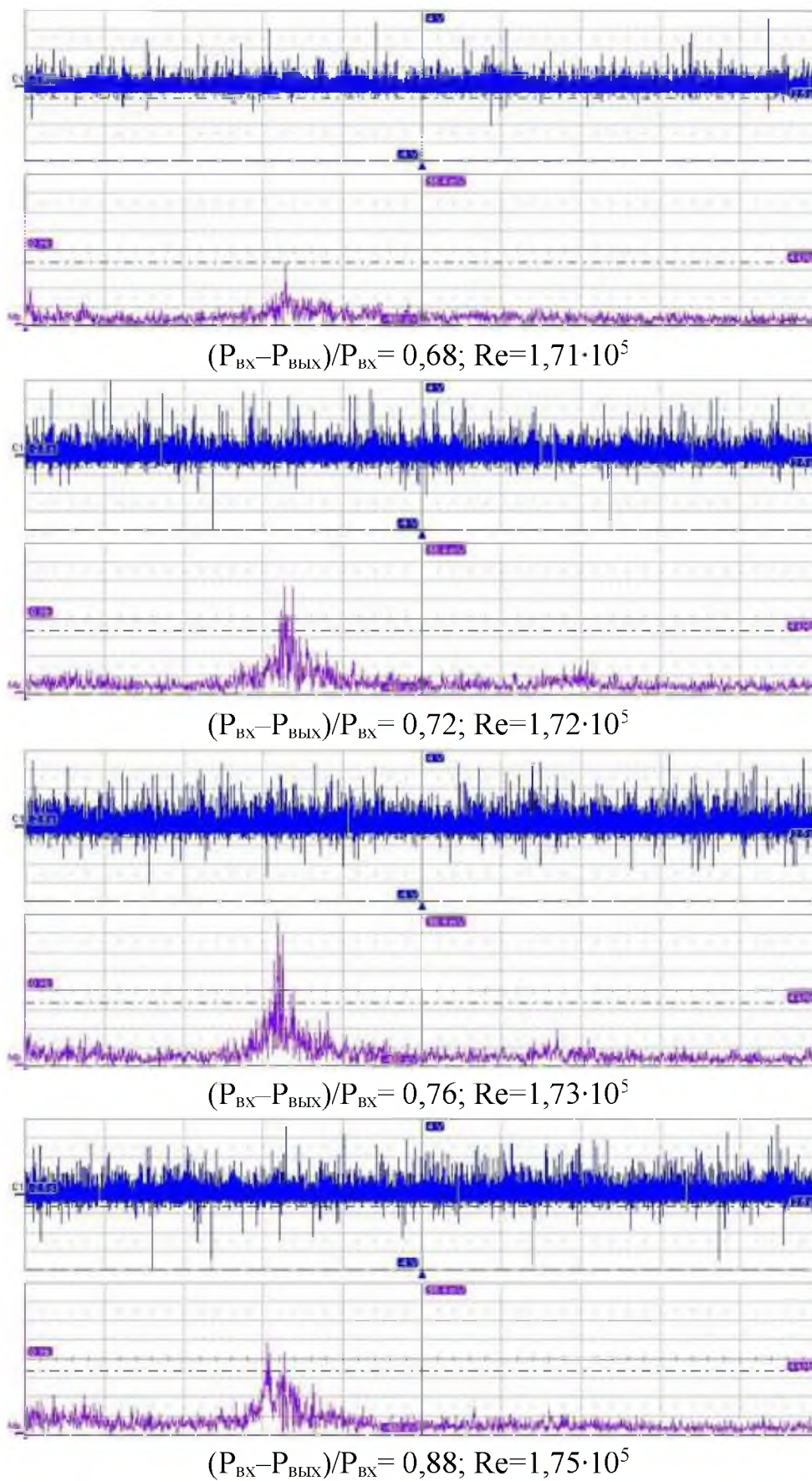


Рис. 9. Амплитудно-частотная характеристика за телом обтекания – стакан, расположенным в два ряда при  $P_{BX} = \text{const}$ ,  $P_{BYX} = \text{var}$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Утверждаю

ИО директора

ООО «Игринская столярка»

Жужгов А.В.

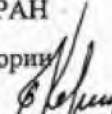
16.04.2010

## Акт

О промышленных испытаниях технологии подготовки к сжиганию и сжигания жидкого горючего топлива на основе нефти Удмуртских месторождений в паровом котле ДКВР 10/13-250 паросилового хозяйства ООО «Игринская столярка».

п. Игра Удмуртия

1. Предмет испытаний.  
Устройство ИЦ НВМТ РАН для приготовления водотопливных эмульсий.
2. Цель испытаний.  
Определение эффективности сжигания водотопливных эмульсий приготовленных из жидкого горючего топлива на основе нефти Удмуртских месторождений в паровом котле ДКВР 10/13-250.
3. Ход испытаний.
  - 3.1. Подготовка водотопливной эмульсии;
  - 3.2. Пуско-наладочные работы по технологии подготовки и сжигания исходного и подготовленного к сжиганию топлива в виде водотопливной эмульсии.
  - 3.3. Проведение опытов на котле ДКВР 10/13-250 при различных режимах подготовки топлива к сжиганию и режимах их сжигания с определением технико-экономической эффективности и надежности работы энергетического оборудования.
4. Результаты испытаний.
  - 4.1. Подготовка жидкого горючего топлива на основе нефти Удмуртских месторождений позволило обеспечить экономичное сжигание топлива практически без химического недожога. По сравнению с исходным вариантом «без эмульгирования топлива» достигнуто четырех кратное снижение химического недожога.
  - 4.2. При сжигании эмульгированного топлива повышена надежность работы парового котла за счет исключения набросов факела горящего топлива на поверхности нагрева, а так же проливов топлива на под топочные камеры.
5. Выводы.
  - 5.1. Достигнуто экономичное сжигание топлива в паровом котле ДКВР 10/13-250 при надежной работе энергетического оборудования.
  - 5.2. Для определения технико-экономической эффективности предложенной технологии подготовки и сжигания жидких горючих топлив на основе нефти Удмуртских месторождений рекомендуется перевести работу котла ДКВР 10/13-250 на длительный срок работы котла в условиях промышленной эксплуатации.

От Научного Центра  
Нелинейной и волновой механики и  
технологии РАН  
Зав. лабораторией  
д.т.н., проф.  Кормилицын В.И.  
« 16 » апреля 2010 г.

От паросилового хозяйства  
ООО «Игринская столярка»



Жужгов А.В.

16 апреля 2010 г.