

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Кибернетики

Направление подготовки (специальность ) 15.04.01 «Машиностроение»

Кафедра «Технология машиностроения и промышленной робототехники»

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Определение технических характеристик размешивания и проектирование оборудования для вязких сред</b>

УДК 621.926.9-253.65:532

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ51	Ху Вэньсяо		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший	Ким А.Б.			

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицын В.В.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Фелорчук Ю.М.	Д.Т.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТМСР	<u>Вильнин А.Д.</u>			

## Планируемые результаты обучения по программе

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	
<b>Профессиональные компетенции</b>		
P1	Способность выбирать аналитические и численные методы при разработке математических моделей машин, приводов, оборудования, систем, технологических процессов в машиностроении	
P2	Способность подготавливать технические задания на разработку проектных решений, разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты технических разработок с использованием средств автоматизации проектирования и передового опыта разработки конкурентоспособных изделий, участвовать в рассмотрении различной технической документации, подготавливать необходимые обзоры, отзывы, заключения	
P3	Способность изучать и анализировать необходимую информацию, технические данные, показатели и результаты работы, систематизировать их и обобщать	
P5	Способность получать и обрабатывать информацию из различных источников с использованием современных информационных технологий, уметь применять прикладные программные средства при решении практических вопросов с использованием персональных компьютеров с применением программных средств общего и специального назначения, в том числе в режиме удаленного доступа	
<b>Общекультурные компетенции</b>		
P6	Способность выбирать оптимальные решения при создании продукции с учетом требований качества, надежности и стоимости, а также сроков исполнения, безопасности жизнедеятельности и экологической чистоты производства	
P7	Способность самостоятельно применять методы и средства познания, обучения и самоконтроля, для приобретения новых знаний и умений.	

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Кибернетики

Направление подготовки (специальность) 15.04.01 «Машиностроение»

Кафедра «Технология машиностроения и промышленной робототехники»

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

Вильнин А.Д.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

(Подпись)

(Дата)

(Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
8ЛМ51	Ху Вэньсяо

Тема работы:

<b>Определение технических характеристик размешивания и проектирование оборудования для вязких сред</b>	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	15.05.2017, №31447/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	15.06.17
--	----------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	<p>Объект исследования – оборудование для размешивания вязких сред. Предмет исследования – параметры перемешивания и конструкционные размеры разных типов импеллеров. Задача:</p> <p>Исследовательские:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Разработать процесс перемешивания в среде геля и шампуне с вязкостью 4000 спз при использовании разных спроектированных видов импеллеров с применением пакетов программ Ansys Fluent и Ansys CFD. (CAE);</li><li>- Выполнить эксперимент по определению эффективности перемешивания импеллерами различной конструкции и провести анализ полученных результатов.</li><li>- Провести экспериментальные исследования на физической модели.</li></ul> <p>Конструкторские:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Разработать экспериментальные модели импеллеров и евро-куба с</li></ul>
---------------------------------	---

	небольшой массой и размерами. - Изготовить экспериментальные модели; - Спроектировать установку для перемешивания геля вязкостью 4000 сПз.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	1. Обзор литературы 2. Краткая характеристика и область применения различных типов импеллеров в жидкостях разных вязкостей. 3. Проектирование нескольких видов импеллеров для перемешивания вязких сред (4000 сПз). 4. Определение самого эффективного импеллера с помощью физических экспериментов и моделирования в системе Ansys-CFD. 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 6. Социальная ответственность
<b>Перечень графического материала</b>	1. Демонстрационный материал (презентация в MS Power Point); 2. Чертежи разных видов импеллеров; 3. Графики моделирования в Ansys Fluent v17.2.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Исследовательский	Ким А.Б.
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицын В.В.
Социальная ответственность	Фелорчук Ю.М.
Исследовательский (на англ. яз.)	Шепетовский Д.В.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Исследовательский раздел	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	<b>15.10.15</b>
---	-----------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ким А.Б.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ51	Ху Вэньсяо		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

<i>Группа</i>	<i>ФИО</i>
8ЛМ51	Ху Вэньсяо

<i>Институт</i>	<i>Кибернетики</i>	<i>Кафедра</i>	<i>Технологии машиностроения и промышленной робототехники</i>
<i>Уровень образования</i>	магистратура	<i>Направление/специальность</i>	150401/Машиностроение

**Тема дипломной работы: «Проектирование оборудования для размещения вязких сред».**

**Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:**

1. Ноксологический анализ инновационных решений по теме диссертации на предмет возникновения:
  - **вредных** проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, эл – магнитные поля, ионизирующие излучения, и других специфических явлений);
  - **опасных** проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной взрывной и другой природы);
  - **негативного** воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу);
  - **чрезвычайных ситуаций** (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)
2. Компетентный обзор законодательных и нормативных документов по теме.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Анализ выявленных **вредных** факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:
  - физико – химическая природа фактора, его связь с разрабатываемой темой;
  - действие фактора на организм человека;
  - приведение допустимых норм с необходимой размерностью (с ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);
  - предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)
2. Анализ выявленных **опасных** факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:
  - механические опасности (источники, средства защиты)
  - термические опасности (источники, средства защиты)
  - электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита - источники, средства защиты);
  - пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения);
3. Охрана окружающей среды:
  - защита селитебной и других зон окружающей среды;
  - анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);
  - анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);
  - анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);
  - разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.
4. Защита в чрезвычайных ситуациях:
  - перечень возможных ЧС на объекте;
  - выбор наиболее типичной ЧС;

<p>разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;  разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС;  разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</p>
<p>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>• организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>
<p><b>Перечень графического материала:</b></p>
<p>План эвакуации  План размещения светильников на потолке рабочего помещения</p>

<i>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</i>	
---	--

***Задание выдал консультант:***

<i>Должность</i>	<i>ФИО</i>	<i>Ученая степень, звание</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>
Профессор	Федорчук Юрий Митрофанович	Доктор технических наук		

***Задание принял к исполнению студент:***

<i>Группа</i>	<i>ФИО</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>
8ЛМ51	Ху Вэньсяо		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«Экономический раздел»**

Студенту:

<i>Группа</i>	<i>ФИО</i>
8ЛМ51	Ху Вэньсяо

<i>Институт</i>	<i>Неразрушающего контроля</i>	<i>Кафедра</i>	<i>Физических методов и приборов контроля качества</i>
<i>Уровень образования</i>	магистр	<i>Направление/специальность</i>	Машиностроение / Технология машиностроения и промышленной робототехники

**Тема дипломной работы: «Проектирование оборудования для размешивания вязких сред»**

**Исходные данные к разделу «Экономический раздел»:**

Целью исследования является проектирование оборудования для размешивания вязких сред, анализ существующих методов и научное обоснование приводимых методов.

Необходимо провести требуемые анализы для сравнения продукта с конкурентами, а также понять в каком состоянии на данном этапе находится продукт и может ли он подвергнуться коммерциализации.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

*Анализ конкурентоспособности продукта;*

*В данном анализе исследуемый продукт сравнивается с ближайшими конкурентами по ряду факторов для определения сильных и слабых мест продукта для дальнейшего эффективного модернизированы последнего.*

*План проекта;*

*В данном разделе приводится линейный график плана работ и затраченного времени для данных работ. С помощью плана можно контролировать выполнение поставленных задач более эффективно.*

*Реестр рисков исследования;*

*В ходе проекта могут возникнуть непредвиденные обстоятельства, которые негативным образом могут повлиять на всю проведенную работу. Данный раздел служит для предупреждения возникающих рисков, а также их анализа.*

*Предположительный бюджет научного исследования;*

*По аналогии с предыдущим разделом, данный раздел прогнозирует возможные и наиболее вероятные расходы при проведении исследования.*

<i>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</i>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<i>Должность</i>	<i>ФИО</i>	<i>Ученая степень, звание</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>
Доцент каф. МЕН	Спицын В.В.			

**Задание принял к исполнению студент:**

<i>Группа</i>	<i>ФИО</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>
8ЛМ51	Ху Вэньсяо		

## Приложение II

### Раздел I

#### Исследовательский раздел на английском языке

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ЛМ51	Ху Вэньсяо		

Консультант кафедры ТМСРР :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Ким А.Б.			

Консультант – лингвист кафедры ИЯИК :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шепетовский Д.В.			



## Содержание

Введение .....	1
1. Исследовательский раздел .....	6
1.1 Литературный обзор .....	6
1.1.1 Обзор научных работ по теме исследования .....	6
1.1.2. Теории перемешивания.....	6
1.1.3. Обзор САЕ-программ для моделирования перемешивания .....	11
1.1.4. Анализ оборудования для размешивания вязких сред.....	13
1.1.5. Анализ конструкций импеллеров.....	18
1.2 Методы исследования и оборудование .....	20
1.2.1 Метод оценки эффективности перемешивания.....	20
1.2.2 Применяемое оборудование и параметры перемешивания .....	21
1.2.3 Определение значение вязкости размешиваемой жидкости .....	29
1.2.4 Определение конструкции импеллеров.....	33
1.2.5 Моделирование процесса перемешивания в ПО ANSYS .	34
1.2.6 Проведение эксперимента по определению наиболее эффективного типа импеллера.....	46
1.3 Результаты исследования.....	51
2. Раздел «Социальная ответственность» .....	53
3. Экономический раздел.....	65
4. Раздел на иностранном языке .....	76
Список литературы.....	85

## Введение

В последнее время в косметическом производстве все большее распространение получает способ механического перемешивания вязких жидкостей, предназначенный для получения высококачественных гелей и шампуней. Особенно вырос спрос на подобные установки в производстве повседневных потребительских товаров. Требования к установкам перемешивания постоянно растут в связи с ростом их использования практически во всех областях промышленности.

Особое место в установках для перемешивания занимают гидродинамические технологии, совмещающие простоту, надежность и высокую эффективность. Проектирование разных видов импеллеров для интенсивного перемешивания является практически обязательным условием при создании современного соответствующего оборудования [1]. Для этого, при создании нового и реконструкции уже имеющегося оборудования необходимо применять точные методы расчета физических процессов (проектирование вида и размера импеллеров и проведение их физического эксперимента, а также моделирование с использованием CFD-библиотек CAE-систем), протекающих в проектируемых установках.

Несмотря на довольно широкое промышленное внедрение технологии перемешивания, вопросы создания новых и совершенствования известных устройств остаются актуальными в связи со сложностью анализа физических процессов перемешивания в миксерах. Поэтому, большое значение приобретает поиск известных и разработка новых методик анализа и расчета, сложных физических явлений с учетом всего многообразия факторов, определяющих технологический процесс в миксере с перемешиванием [2,3].

Большой вклад в развитие теории проектирования оборудования перемешивания внесли такие известные исследователи как Свенчанский А. Д., Рафалович И. М., Громов Б. С., Артюмов В. А., Анищенко Л. М., Андреев А. Д. [10, 11, 3, 4, 12]. В развитие теории моделирования в ANSYS внесли такие выдающиеся исследователи как Вольдек В. И., Верте Л. А., Кирко И. М.,

Лиеласиус О. А., Милпетер Я. Я., Валдманис Я. Я, Тимофеев В. Н. [13, 14, 15, 16]. Особенно следует отметить гидромеханику, которая дает методы для оценки эффективности с точки зрения расположения линий потока [17,18].

Существенным недостатком подходов у всех вышеназванных исследователей является большое количество упрощений расчетных моделей и невозможность точной количественной оценки параметров технологического процесса. Можно сказать, что существующие методики подходят скорее для примерного общего анализа процессов, чем для точного определения гидродинамического процесса, в том числе, в литературе практически нет информации об эффективности перемешивания у стенок емкости, в которой происходит перемешивание. Вторым существенным недостатком существующих методик является их «разделенность» т.е., методы

расчета перемешивателей не учитывают процессы в разных средах, (большинство выполняет расчет только для воды) особенности миксеров, а методики расчета миксеров в свою очередь не учитывают влияние высокой вязкости, что приводит к искаженной оценке эффективности работы агрегата в целом.

Все вышеперечисленные недостатки существующих методик можно объяснить скорее историческим фактором, нежели некорректностью математического аппарата и применяемых подходов. В настоящее время исследователи имеют возможность использовать все преимущества вычислительных систем и специального программного обеспечения, что обуславливает резкое увеличение решения сложных и разнообразных задач [19].

Цель диссертационной работы – исследование гидродинамических процессов при перемешивании в среде геля и шампуня с вязкостью 4000 спз для повышения производительности в миксерах и проектирование оборудования для перемешивания.

Объект исследования – оборудование для размешивания вязких сред.

Предмет исследования – параметры перемешивания и конструкционные размеры разных типов импеллеров.

### **Постановка задачи:**

#### **Исследовательские:**

- Провести анализ конструктивных особенностей существующих типов импеллеров;
- Провести анализ миксеров с программных средств Visimix для определения геометрических параметров импеллеров и их гидродинамических процессов а также их режимов перемешивания;
- Разработать процесс перемешивания в среде геля и шампуне с вязкостью 4000 спз при использовании разных спроектированных видов импеллеров с применением пакетов программ Ansys Fluent и Ansys CFD. (CAE);
- Выполнить эксперимент по определению эффективности перемешивания импеллерами различной конструкции и провести анализ полученных результатов.
- Провести экспериментальные исследования на физической модели.

#### **Конструкторские:**

- Разработать экспериментальные модели импеллеров и евро-куба с небольшой массой и размерами.
- Изготовить экспериментальные модели;
- Спроектировать установку для перемешивания геля вязкостью 4000 спз.

## Методы исследования.

Поставленные задачи решены современными методами вычислительной математики. При разработке моделей использованы пакеты программ Ansys Fluent v17.2 и Ansys CFX v17.2. В экспериментальных исследованиях использовались методы физического моделирования с соблюдением гидродинамического подобия.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. Предложена модель, позволяющая проводить анализ гидродинамических процессов в миксерах с механическим перемешиванием.

2. Предложены результаты (сравнение плотности линий потока жидкости в процессе перемешивания разными видами импеллеров), позволяющие оценить эффективность работы.

Практическая ценность:

1. Разработаны модели и комплекс программ, обеспечивающие анализ совместных гидродинамических полей в перемешивании на базе двух комплексов программ Ansys Fluent v17.2 и Ansys CFX v17.2 с возможностью расширения решаемого круга задач.

2. Предложены технические решения для проектирования и управления режимами работы перемешивающей установки.

3. Разработаны рекомендации по повышению эффективности перемешивания.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы, определены основная цель и задачи, сформулированы новизна и практическая ценность научных результатов, а также дано краткое описание работы.

В первом разделе определен объект исследования, изложен принцип работы технологической установки, дана характеристика физических явлений. В главе, также перечислены установки для перемешивания вязких сред и конструкций импеллеров.

Во втором разделе представлена модель, позволяющая проводить оценку эффективности в процессе перемешивания. Оценка получена при использовании Ansys Fluent v17.2 и Ansys CFX v17.2, что позволяет производить анализ механического перемешивания в течении заданного времени.

В третьем разделе приведены результаты решения на основе рассмотренной ранее физической и САЕ модели. В результатах показано влияние различных параметров на эффективность перемешивания, определены характеристики механического перемешивания. Получены основные характеристики геля (динамическая вязкость и т.д), определено плотности линий потока жидкости в процессе перемешивания разными

видами импеллеров.

Также представлены результаты проверки разработанной модели на физической модели. Результаты сравнений позволяют сделать вывод о достоверности выбора самой эффективной модели при перемешивании в среде геля и шампуня с вязкостью 4000 сПз.

В заключении изложены основные выводы и результаты работы.

# 1. Исследовательский раздел

## 1.1 Литературный обзор.

### 1.1.1 Обзор научных работ по теме исследования

Разработкой теории перемешивания и разработкой конструкций разных импеллеров занимались Касаткин А. Г. [3], Щупляка И.А. [4] и другие.

Исследовательские работы в области создания оборудования для размешивания вязких сред проводили Стренк Ф.И. [5], Ермолин Н.П. [6] и другие.

Разработкой теории моделирования и расчёта на скорость циркуляции, период циркуляции и потерь энергии вдоль радиуса занимались Чебышев П.Л. [7], Панкратов И.И., Дунаев П.Ф., Леликов О.П., Решетов Д.Н., Чернавский С.А. и другие.

Эффективность импеллеров исследовали Волков Д.П. [8], Иванов М.Н., Крайнев А.Ф. и другие.

### 1.1.2. Теории перемешивания

- *Общее описание процесса смешения*

Для производства суспензий, эмульсий, а также смесей твердых веществ, применяется перемешивание. Также этот процесс используется на химических производствах для активизации процессов массообмена и теплообмена. Кроме того, интенсивное перемешивание требуется для проведения многих непрерывных химических процессов.

Существует несколько видов перемешивания и оборудования для его проведения в зависимости от агрегатного состояния смешиваемых материалов. Химическая реакция и перемешивание - процессы, которые могут протекать как отдельно, так и совместно, а также совпадать по времени и по месту проведения. Для отдельного проведения процесса перемешивания используются смесители, а для одновременного проведения перемешивания и химического превращения - реакционные аппараты, оснащенные мешалками.

В зависимости от среды, в которой протекает процесс, выделяют несколько видов перемешивания (смешивания):

- в жидкой среде;
- в твердой среде;
- в сыпучей среде;
- в тестообразной среде.

В химической технологии активно используется метод перемешивания веществ, находящихся в различных агрегатных состояниях, с целью получения:

- гомогенных растворов;
- равномерных гетерогенных смесей-эмульсий;
- суспензий;
- твердых сыпучих материалов.

Агрегатное состояние и физические свойства перемешиваемых веществ, а также требования к получаемым смесям, определяют методы перемешивания, и, как следствие, тип конструкции перемешивающего устройства. В любом случае, задача перемешивающего оборудования, состоит в производстве однородной смеси при минимальном расходе энергии и максимальных показателях производительности.

Наиболее распространенными методами перемешивания жидких сред в промышленности являются:

- барботажный;
- перемешивание при помощи механических мешалок, совершающих колебательные/вращательные движения;
- перемешивание посредством размещения в потоке статичных турбулизирующих устройств;
- перемешивание при помощи центробежных/струйных насосных установок.

Независимо от метода, процесс смешения жидкости заключается в многократном перемещении ее частиц относительно друг друга. Сложное движение жидкости, возникающее по мере вращения мешалки, складывается из трех направлений:

- радиального  $u_r$  (вдоль радиуса вращения);
- тангенциального  $u_t$  (по касательной к окружности, которую описывает конец мешалки);
- осевого  $u_o$  (вдоль оси вала).

В зависимости от типа мешалки, пропорции элементов движения перемешиваемого вещества, могут различаться.

Смешивая два вещества или более, мы должны получить смесь, компоненты которой максимально равномерно распределены. Заметим, что вещества в смеси взаимно распределяются, однако химически они не соединяются.

На начальном этапе процесса смешения компоненты существуют отдельно друг от друга или лишь незначительно перемешаны. После длительного перемешивания происходит интенсивное взаимное распределение, которое ведёт к получению общего равномерного распределения.

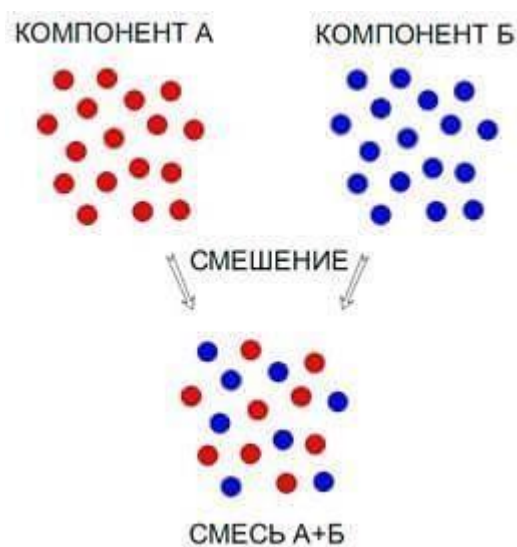


Рис. 1. Процесс смешения

При смешивании веществ можно получить различные смеси: гомогенные и гетерогенные. Гомогенные смеси характерны тем, что в них происходит распад компонентов на мельчайшие частицы (атомы или молекулы) и их однородное распределение друг в друге.

К гомогенным смесям относят:

- солевые растворы;
- металлические сплавы;
- смеси газообразных веществ и прочее.

Гетерогенные смеси характерны присутствием в них компонентов в виде капель или порошка с определённой зернистостью. В таком виде они и распределяются друг в друге. Сюда относятся порошки, суспензии, эмульсии, аэрозольные вещества и т.д.

Смеси широко используются в промышленности:

- для получения промежуточного и конечного продукта, смешивая 2 или более компонента. Здесь можно получить смеси жиров, красок или удобрений;
- смешиванием получают исходные смеси для химических реакций;
- посредством перемешивания контролируют протекание реакции в смеси, так как скорость любой реакции определяется размером площади соприкосновения реагентов.

Агрегатное состояние веществ при смешивании определяет способы смешения:

- смешивание мешалками, при котором с помощью механических подвижных вращающихся элементов смешиваются жидкости (две или более), или в них растворяют газообразные, твёрдые или жидкие компоненты;



- смешение с разделением потока, при котором газы, жидкости смешиваются в соплах, насосах, смесителях с использованием неподвижно вмонтированных делителей потока;

- замешивание, то же самое, что и смешивание, при котором соединяемые вещества находятся в жидкотекучем или пастообразном состоянии;

- сухое смешивание, при котором смешиваются порошкообразные вещества сухими или слегка увлажнёнными;

- разбрызгивание, распыление - это методы, при которых жидкости, капли или порошки тонкой фракции выбрасываются в воздух, образуя при этом туман или пыль;

- газирование, псевдооживление - это методы, при которых в жидкости или твёрдом порошке образуются очень мелкие пузырьки газа. Между газом и веществом должен достигаться при этом максимально сильный контакт;

- механическое перемешивание, при котором посредством мешалки жидкости смешиваются друг с другом, либо твёрдое вещество распределяется или растворяется в жидкости, образуя при этом суспензию, раствор или эмульсию.

- *Перемешивание*

Перемешивание – один из самых распространенных процессов на предприятиях пищевой и химической промышленности. При перемешивании частицы жидкости или сыпучего материала многократно перемещаются в объеме аппарата или емкости друг относительно друга под действием импульса, который передается перемешиваемой среде от механической мешалки или струи жидкости, газа или пара [10].

- Цели перемешивания:

- ускорение течения химических реакций или процессов,
- обеспечение равномерного распределения твердых частиц в жидкости,
- обеспечение равномерного распределения жидкости в жидкости,
- интенсификация нагревания или охлаждения,
- обеспечение стабильной температуры по всей жидкости.

Существует много конструкций перемешивающих устройств, но наиболее распространены механические мешалки с вращательным движением перемешивающих органов.

Наряду с этим осуществляется перемешивание газом или паром, перемешивание циркуляцией жидкости, вибрационное или пульсационное

перемешивание.

Каждый из перечисленных типов перемешивающих устройств имеет свои специфические преимущества и недостатки и определенную область применения.

При подборе перемешивающего устройства или способа перемешивания используются следующие основные понятия:

- Степень перемешивания или степень взаимного распределения двух или более веществ или жидкостей после окончания перемешивания всей системы. Степень перемешивания, иногда называемая показателем однородности, определяется опытным путем на основании взятых проб и используется для определения эффективности перемешивания.

- Интенсивность перемешивания, выражаемая с помощью определенных величин, таких как частота вращения мешалки, расходуемая на перемешивание мощность приведенная к единице объема или плотности продукта. На практике интенсивность перемешивания определяется временем достижения конкретного технологического результата, т.е. равномерности перемешивания.

- Эффективность перемешивания, определяемая возможностью достижения требуемого качества перемешивания за кратчайшее время и с минимальными затратами энергии. Таким образом из двух аппаратов с мешалками более эффективно работает тот, в котором результат достигается с наименьшими затратами энергии.

К сожалению до сих пор нет универсального критерия или метода, позволяющего выбрать соответствующую мешалку для конкретного процесса. Поэтому для наиболее правильного выбора типа перемешивающего устройства необходимо руководствоваться опытом и результатами лабораторных испытаний.

В результате анализа установлено, что для правильного подбора перемешивающего устройства необходимо очень точно знать такой параметр продукта, как вязкость.

- *Определение вязкости*

Вязкость (внутреннее трение) — одно из явлений переноса, свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. В результате работы, затрачиваемая на это перемещение, рассеивается в виде тепла.

Механизм внутреннего трения в жидкостях и газах заключается в том, что хаотически движущиеся молекулы переносят импульс из одного слоя в другой, что приводит к выравниванию скоростей — это описывается введением силы трения. Вязкость твердых тел обладает рядом специфических особенностей и рассматривается обычно отдельно.

Вязкостью жидкости называется способность ее частиц оказывать сопротивление их взаимному перемещению. Вязкость обычно выражается в пуазах (Пз). Одна сотая часть пуаза называется сантипуазом (сПз). Вязкость воды при температуре 20 градусов цельсия равна 1 сПз. В научно-технической литературе вязкость выражается в паскалях на секунду (Пас). 1 Паскаль на секунду равен 10 Пуазам.

Различают динамическую вязкость (единица измерения в Международной системе единиц (СИ) — Па·с, в системе СГС — пуаз;  $1 \text{ Па}\cdot\text{с} = 10 \text{ пуаз}$ ) и кинематическую вязкость (единица измерения в СИ —  $\text{м}^2/\text{с}$ , в СГС — стокс, внесистемная единица — градус Энглера). Кинематическая вязкость может быть получена как отношение динамической вязкости к плотности вещества и своим происхождением обязана классическим методам измерения вязкости, таким как измерение времени вытекания заданного объёма через калиброванное отверстие под действием силы тяжести. Прибор для измерения вязкости называется вискозиметром.

Для нашего эксперимента, при  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ , вязкость геля составляет примерно 4000 сПз.

### 1.1.3. Обзор CAE-программ для моделирования перемешивания

Внедрение в инженерную практику методов автоматизации проектирования позволяет перейти от традиционных методов проектирования котлоагрегатов к их моделированию с помощью CAD/CAM/CAE на персональных компьютерах.

- *ANSYS Fluent*

ANSYS Fluent является самым мощным инструментом для вычислительной гидродинамики, позволяющим ускорить и углубить процесс разработки и повышения эффективности любых изделий, чья работа так или иначе связана с течениями жидкостей и газов. Он содержит широкий набор тщательно верифицированных моделей, обеспечивающих быстрое получение точных результатов для самых разных задач гидро- и газодинамики. Fluent предлагает богатый выбор моделей для описания течений, турбулентности, теплопереноса, химических реакций, позволяющих моделировать широчайший спектр процессов: от обтекания крыла самолёта до горения в топке котла ТЭЦ, от пузырькового течения в барботажной колонне до волновой нагрузки на нефтяную платформу, от кровотока в артерии до осаждения паров металла при производстве полупроводников, от вентиляции дата-центра до течения в очистных сооружениях.

Для выполнения анализа эффективности перемешивания в данной работе, необходимо найти поле скоростей в резервуаре с мешалкой. В разделе 1.2.4 будет рассмотрено моделирование перемешивания жидкости в резервуаре мешалками трех видов.

Как известно, аналитическое решение возможно только для небольшого числа задач (например, плоское течение Пуазейля, плоское течение Куэтта).

Одним из способов выхода из этой ситуации является численное решение. Методы вычислительной гидродинамики (ВГД или CFD (Computational fluid dynamics)) предполагают расчет течений жидкостей и газов путем численного решения уравнений Навье–Стокса и уравнения неразрывности. В настоящее время существуют десятки компьютерных программ, предназначенных для решения задач CFD [13]. В данной работе использовался коммерческий CFD-пакет ANSYS. Моделирование будет проведено в Ansys Fluent v17.2, при использовании MRF (множественными вращающимися системами координат) метода.

Построенная модель состоит из двух доменов. Один – это цилиндр с пустотой внутри в форме мешалки, второй – окружающий резервуар.

Порядок проведения моделирования в Ansys следующие:

- Выберу модель турбулентности
- Задаю frame motion для цилиндра -в единице rpm. Резервуар стационарен.
- Задаю относительное вращение для стенок доменов
- Задаю Mesh Interface между цилиндром и резервуаром
- Проверю качество сетки в бланке Statistics
- Использую Simple scheme, Second Order

Решение сходится на 1000 итерации.

- *VisiMix Turbulent*

VisiMix Turbulent представляет собой уникальный программный инструмент для математического моделирования для математического моделирования процессов смешивания и смешивания в жидкостях с разной вязкостью и многофазных смесях. Программа предоставляет параметры процесса, необходимые для анализа, масштабирования и оптимизации смесительных резервуаров и реакторов со всеми типами рабочих колес.

Его основные возможности:

- ньютоновская и неньютоновская среды;
- широкий диапазон размеров;
- универсальные технологические приложения;
- встроенные базы данных.

При смешивании одновременно происходят два конкурирующих процесса распада и слияния капель. Интенсивность обоих процессов и, следовательно, результаты эмульгирования определяются локальной интенсивностью смешивания (скорость сдвига, удельная мощность и т. Д.), Которая, в свою очередь, зависит от характеристик резервуара и крыльчатки и от физических свойств исходного жидкостей.

VisiMix имитирует образование эмульсии, определяет, достигается ли полная эмульгирование, вычисляется средний размер капли, удельная площадь массопереноса, время смешивания и другие параметры процесса, важные для эмульгирования и т.д.

Для ускорения настройки геометрий миксера и повышения их эффективности в модуль Mixer (Миксер) можно использовать часть, содержащая готовые

геометрические компоненты для миксера. Такая часть включает в себя геометрии для осевых роторов, радиальных роторов и роторов для текучих сред высокой вязкости. Помимо роторов в данной части доступны геометрии баков трех разных типов и геометрия вала цилиндрического ротора. Все части миксера параметризованы набором входных параметров, соответствующих важным геометрическим характеристикам каждой части. Их можно отрегулировать, чтобы адаптировать параметры миксера к исследуемой системе и поэтому может помочь определить подходящие размеры проектируемых миксеров.

#### 1.1.4. Анализ оборудования для размешивания вязких сред

##### *Общая характеристика аппаратов для перемешивания жидких сред*

В химической промышленности перемешивание в жидких средах применяется для приготовления растворов, эмульсий, суспензий, а также для интенсификации химических, тепловых и диффузионных процессов. Емкостные аппараты, оснащенные перемешивающими устройствами, в большинстве своем универсальны и пригодны для реализации комплекса процессов (нагревание, растворение, химическая реакция, охлаждение, суспензирование осадка).

Наиболее важными характеристиками перемешивающих устройств, которые могут быть использованы для их сравнительной оценки, являются интенсивность перемешивания и эффективность устройства. *Интенсивность перемешивания* определяется затратами энергии на единицу расхода перемещаемой жидкости. Мерой интенсивности перемешивания может

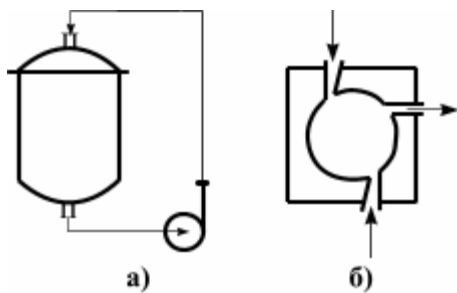


Рис. 3.1 Способы перемешивания  
а) циркуляционное, б) в сопле

служить отношение затрат мощности к объему  $N/V$  или массе  $N/m$  перемешиваемой жидкости, а для механической мешалки – число оборотов при фиксированной продолжительности процесса. *Эффективность перемешивающего устройства* является характеристикой качества проведения процесса. Способ ее оценки определяется целью перемешивания, например, при суспензировании эффективность определяется степенью равномерности распределения твердой фазы в объеме аппарата, при интенсификации тепловых и диффузионных процессов – отношением коэффициентов тепло- и массоотдачи с перемешиванием и без него. В каждом конкретном случае эффективность должна соотноситься с целесообразной интенсивностью, т.е. расходом энергии и времени на проведение процесса.

Различают два основных способа перемешивания в жидких средах: механический (с помощью мешалок различных конструкций) и пневматический (сжатым воздухом или инертным газом). Кроме того,

применяют перемешивание в трубопроводах (за счет турбулентного режима течения компонентов), циркуляционное (многократное прокачивание жидкости через систему аппарат-циркуляционный насос) и перемешивание в соплах (рис. 3.1). Наибольшее распространение в практике получил механический способ. Механическое смешение

Механическое перемешивание производится мешалками, которые состоят из одной или нескольких пар лопастей. Лопасти закреплены на валу, который вращается от электродвигателя или трансмиссии (используется зубчатая, фрикционная или червячная передача.)

В химической промышленности для смешивания веществ и реакций в жидком состоянии используются подобные сосуды аппарат с мешалкой. Смешивание происходит в условиях окружающей среды или при температуре макс. 150°. Сосуды могут быть из легированных и нелегированных сортов стали, эмалированные, с резиновым покрытием.



Рис. 2 Обычный сосуд с мешалкой

Важнейшим компонентом такого сосуда или ёмкости является мешалка, т.е. механизм её вращения, а также встроенные и навесные приспособления, например, термометр, манометр и другие измерительные приборы.

Сосуд для смешивания представляет собой цилиндрическую ёмкость с днищем и крышкой выпуклой формы, в которой присутствуют несколько отверстий (горловин), оснащенных фланцами.

Центральный фланец – несущий, на нём расположен фонарь с мешалкой. Для визуального контроля могут использоваться смотровые стекла. Делители потока, которые также могут быть установлены внутри сосуда, называют иначе разбивателями течения. Вместе с мешалкой они более интенсивно перемешивают компоненты. Обычно применяют от 2 до 4 таких делителей. В днище бака обычно располагают выпускной патрубок. Сосуд с мешалкой устанавливается на лапах, захватах или кольцевой опоре.

### **Сосуды с мешалкой, работающие под высоким давлением**

Для реакций, протекающих при высоком давлении и в прерывистом режиме работы, применяют специальные сосуды, именуемые автоклавами с мешалкой.

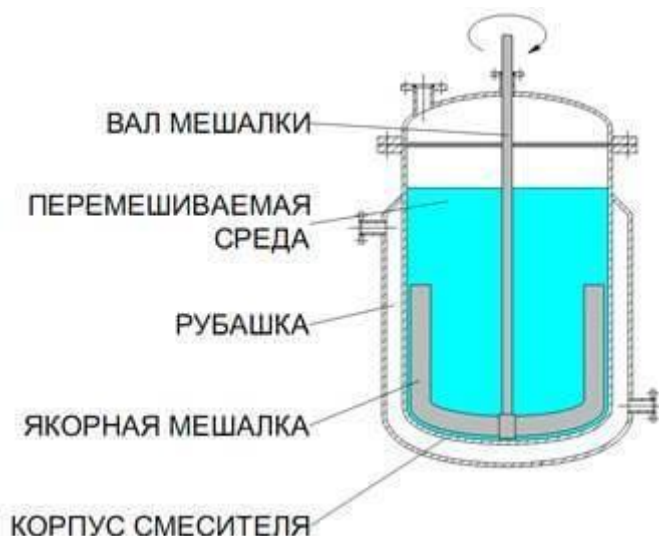


Рис. 3 Специальный сосуд с мешалкой

Основное его отличие от обычного сосуда с мешалкой состоит в том, что стенки, днище, стенки фланцев, горловин сконструированы с использованием более толстых элементов. Сосуд, работающий под высоким давлением, не имеет чаще всего выпускных патрубков.

Опорожнение происходит путём опрокидывания или отсасывания через отверстие (горловину) в крышке. Пастообразные продукты реакции удаляют лопатой или скребками. Давление в сосуд поступает по напорному трубопроводу через напорный патрубок. Материал, применяемый при изготовлении сосудов подобного рода, высокопрочная сталь, часто нержавеющей.

Также существуют другие аппараты с механическими мешалками, которые представляют собой вертикальную цилиндрическую емкость, на корпус которой установлено перемешивающее устройство, включающее вертикально расположенный вал, на котором размещены одна или несколько (до 4-х) мешалок, уплотнение вала, привод и муфту, соединяющую вал привода с валом мешалки (рис. 3.2). Привод осуществляется от электродвигателя, как правило, через редуктор или клиноременную передачу. Аппарат может

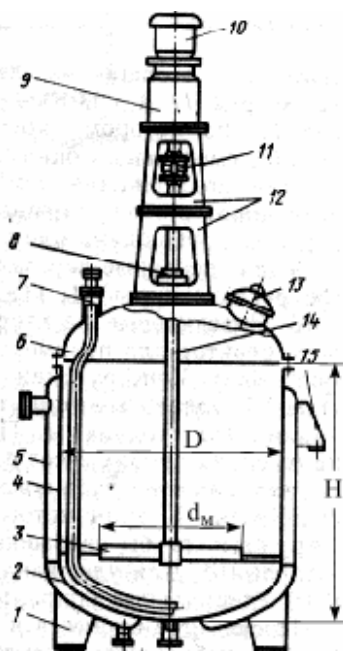


Рис. 3.2 Аппарат с механическим перемешивающим устройством

1,15 - опоры: стойка и лапа, 2 - днище, 3 - мешалка, 4 - обечайка, 5 - рубашка, 6 - крышка, 7 - труба передавливания, 8 - уплотнение вала, 9 - редуктор, 10 - электродвигатель, 11 - соединительная муфта, 12 - стойка привода, 13 - люк, 14 - вал.

комплектоваться внутренними устройствами для создания определенного режима перемешивания (диффузор, отражательные перегородки), теплообменными устройствами (змеевик, рубашка). Выбор конкретного аппарата определяется свойствами перемешиваемой среды, требуемой производительностью, необходимыми для проведения процесса температурой и давлением.

Важнейший элемент аппарата – перемешивающее устройство, конструкция которого должна отвечать следующим условиям: 1) установка на вал нескольких мешалок допускается при невозможности обеспечить требуемый режим перемешивания одной мешалкой и если отношение высоты заполнения аппарата к его диаметру  $H/D > 1.3$ ; 2) при размещении на валу нескольких мешалок их конструкция и размеры должны быть одинаковыми, расстояние между соседними мешалками не должно быть меньше их диаметра,  $d_m$ ; 3) высота установки нижней мешалки над днищем аппарата при  $D/d_m > 1.5$  должна быть в пределах  $(0.4 \div 1) \cdot d_m$ , но не выше  $H / 2$ ; при  $D/d_m \leq 1.5$  - в пределах  $(0.5 \div 5) \cdot (D - d_m)$ , но не выше  $D/4$ .

Кроме того, часто возникает необходимость в перемешивании компонентов жидкости в емкостях, имеющих узкую горловину. В горловину стандартная мешалка пройти не сможет, а вручную, как известно, эффективность перемешивания значительно снижается. Для этой цели разработаны специальные складные мешалки. Часто ее используют в таких емкостях, как еврокуб.

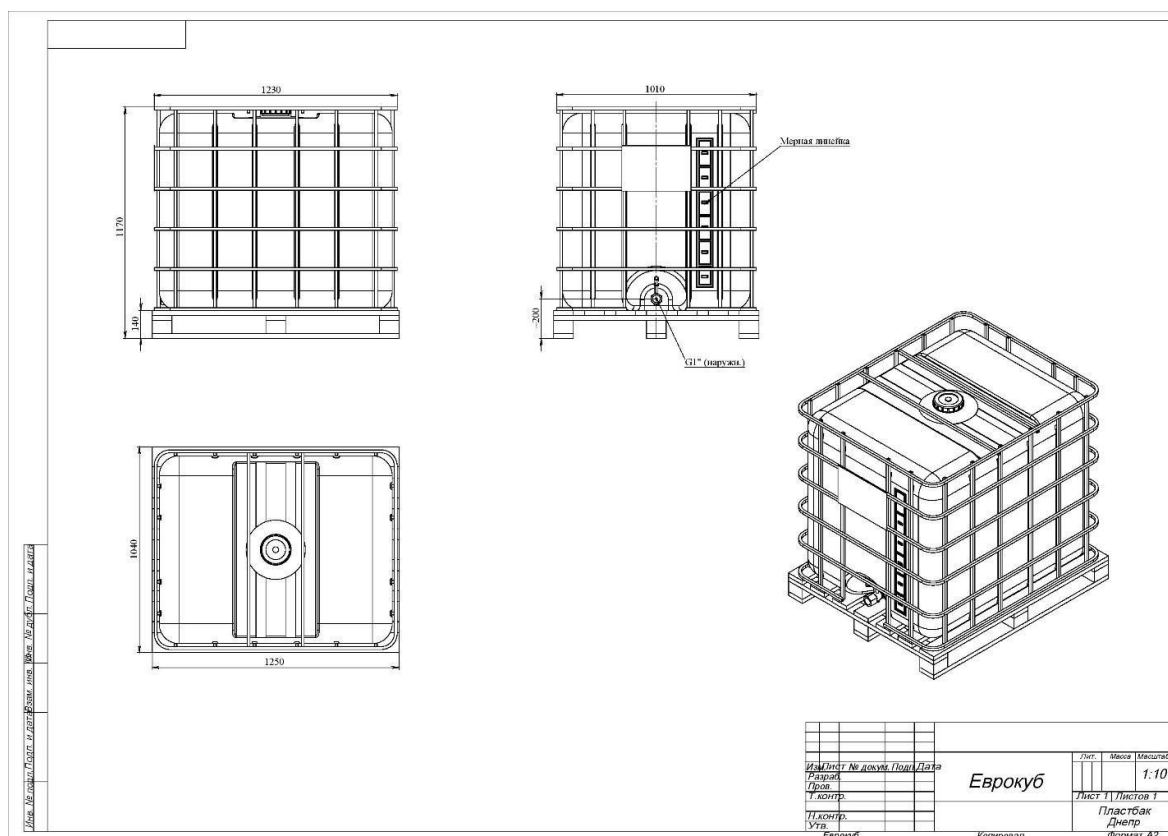


Рис. 4. Еврокуб



Еврокубом называют удобную для транспортировки кубическую емкость, рассчитанную на вместимость 1000 л и выполненную из пластика. Интересна конструкция складной мешалки. Вал мешалки оснащен крестовиной с лопастями. В неподвижном положении лопасти естественным образом складываются, что дает возможность опустить их в этом состоянии в любую по габаритам горловину емкости, в данном случае, еврокуб. После того, как на мотор-редуктор подается питание, и вал начинает совершать вращательные движения, лопасти под воздействием силы инерции выпрямляются в горизонтальное положение. В таком положении мешалка становится аналогом пропеллерной или лопастной конструкции, что обеспечивает должную эффективность процесса перемешивания.

### **Параметры складных типовых мешалок для еврокуба:**

Диаметр мешалки, мм	Число оборотов мешалки, мин <sup>-1</sup>	Мощность привода, кВт
250	95-300	0.17-0.75
300	80-260	0.25-1.1
350	70-220	0.3-1.5
400	60-190	0.55-2.2
450	55-170	0.55-2.2
500	50-155	1.1-3.0

Мощность привода принимается в зависимости от числа мешалок, диаметра мешалок, числа оборотов, плотности и динамической вязкости перемешиваемых компонентов.

В результате анализа установлено, что для экономии и простоты оборудования, следует рассматривать механическое перемешивание в еврокубе.

#### **1.1.5. Анализ конструкций импеллеров**

В качестве импеллеров промышленных мешалок обычно используются: лопастная мешалка, пропеллерная мешалка, турбинная мешалка, рамная мешалка, фрезерная мешалка и коническая мешалка.

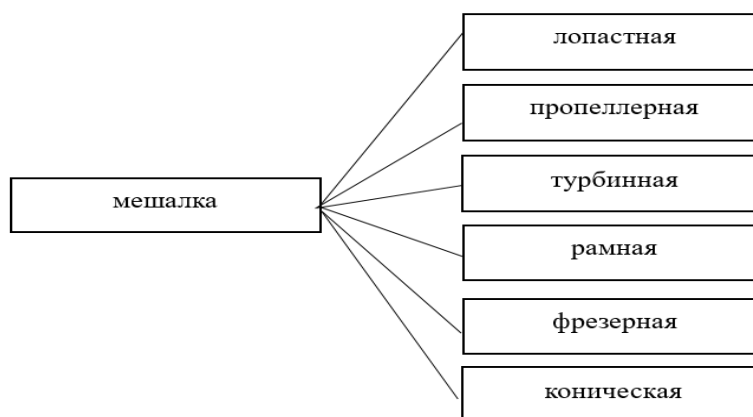


Рис. 5. Классификация по разновидностям импеллеров

Импеллеры можно разделить на быстроходные и тихоходные.

Группа мешалок быстроходного типа, в зависимости от формы и расположения мешалок показана на рис. 6.



Рис. 6. Мешалки быстроходные

Особенности мешалок быстроходного типа:

1. мощность двигателя от 0.37кВт до 3.0 обеспечивает эффективное смешивание с вязкостью до 2000 сПз;
2. скорость вращения составляет от 250-350 оборотов. Данная скорость нужна для раскрытия импеллера путем центробежной силы;
3. возможно исполнение разных вариантов импеллеров, как с однорядным расположением, так и с 2-х рядным.



Рис. 7. Мешалки тихоходные

Особенности мешалок тихоходного типа:

1. тихоходные мешалки с мотор-редуктором, конструкционно допускающие возможности осуществления фланцевых соединений различных типов.
2. импеллеры могут быть турбинного и якорного вида, лопастные, рамные и т.д., в том числе и с нижней опорой;
3. данные перемешивающие устройства применяются для всех видов жидкостей и растворов, начиная от жидкостей с плотностью и вязкостью как у воды, заканчивая жидкостями значительно высокой вязкости;
4. данные мешалки применяются на предприятиях химической

промышленности, нефтехимической, горной, металлургической, морской отрасли, в том числе в очистных комплексах;

5. устройства оснащаются двигателями до 350 кВт и выше. Электродвигатель может комплектоваться частотным преобразователем частоты, вариатором, дополнительным охлаждением и другими опциями. Так же приводом для мешалки могут быть так же гидродвигатель;

6. импеллеры могут быть как однорядные, так и многорядные и иметь скорость вращения от 1 до 340 об/минуту.

Из выше описанных конструкций мешалок, мешалка должна иметь наименьшую массу на единицу мощности, а также оптимальную эффективность перемешивания вещества.

## 1.2 Методы исследования и оборудование

### 1.2.1 Метод оценки эффективности перемешивания

В качестве меры интенсивности перемешивания на микроуровне часто выступают величины, характеризующие микромасштаб турбулентного переноса в аппарате с мешалкой, такие как колмогоровские длина  $l_k$  и время  $t_k$ , определяемые как [2]

$$l_k = \left( \frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{3/4}$$

$$t_k = \sqrt{\frac{\nu}{\varepsilon}}$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости,  $\varepsilon$  — диссипация энергии в единице массы.

В настоящее время определение интенсивности диссипации энергии может быть проведено экспериментально, с использованием химических методов или лазерной доплерографии, или с помощью численного моделирования процессов перемешивания в рамках вычислительной гидродинамики [12], [13].

Однако обе этих группы методов являются достаточно сложными и дорогостоящими, что делает их малоприменимыми в производственной практике.

Таким образом, имеется необходимость в разработки математической модели, являющейся достаточно простой, и одновременно, обеспечивающей оценку параметров мешалок.

В настоящее время, в основе расчета перемешивающих устройств в России лежит методика, разработанная в начале 80-х годов двадцатого века. Наиболее полное ее изложение приведено в [14].

В ее основе лежит утверждение о равенстве моментов, проложенных к жидкости со стороны перемешивающего органа  $T_{вр}$  и сил сопротивления со стороны ограждающих поверхностей и внутренних неподвижных устройств  $T_k$ :

$$T_{вр} - T_k = 0 \quad (1)$$

При этом момент сил сопротивления со стороны корпуса при отсутствии внутренних устройств, вычисляется как

$$T_k = 2\pi R^2 H \tau$$

где  $R$  — радиус корпуса аппарата;  $H$  — высота жидкости в аппарате;  $\tau$  — касательное напряжение на корпусе аппарата.

Данная модель является достаточно простой для реализации и одновременно обладает потенциалом для развития, как это сделано, например, в известном программном продукте Turbulent™ 2Kx компании VisiMix Ltd [15].

В программе Visimix принимают представленную выше методику к анализу процессов перемешивания в цилиндрическом аппарате с однолопастной мешалкой. Для расчета использовался интервал чисел Рейнольдса  $Re = 3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ .

## 1.2.2 Применяемое оборудование и параметры перемешивания

Для определения эффективной скорости вращения импеллера необходим привод с плавным регулированием угловой скорости. Поэтому для проведения эксперимента был выбран станок с ЧПУ EMCO CONCEPT MILL 155.

Т.к. рассматриваемые установки для перемешивания вязких сред предполагаются к использованию с кубическими емкостями типа евро-куба, то в качестве емкости для перемешивания в экспериментах была также использована кубическая емкость, составленная из прозрачных пластинок органического стекла для наблюдения за процессом перемешивания.

Для симуляции и расчета использовалась программа Visimix. Она помогает вычислить основные гидродинамические параметры и другие параметры при перемешивании.

## Fluid Forces

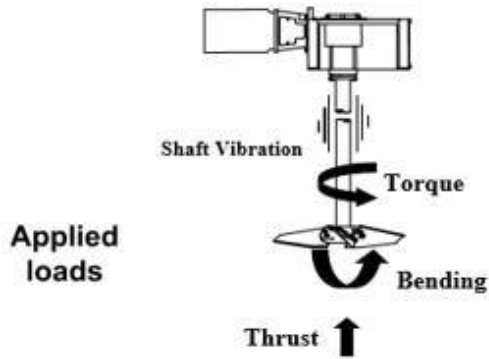


Figure 1. Fluid Forces Acting on a Mixer.

Рис. 8 действующие силы на импеллере

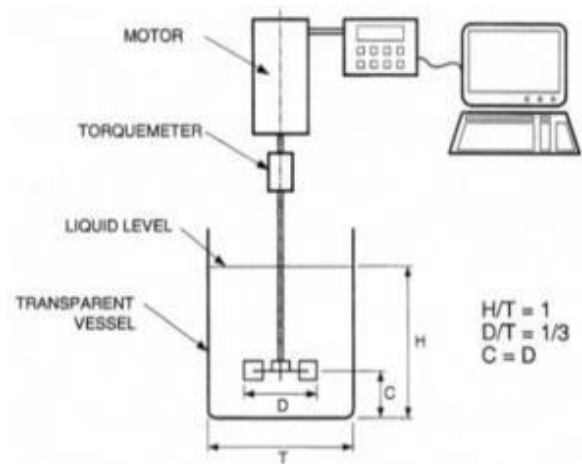


Рис. 9 схема эксперимента

В программе Visimix, по экспериментальному размеру евро-куба и вязкости геля можно определить не только гидродинамические параметры, но и размерные параметры импеллера.

Ниже показан расчет параметр импеллера в Visimix.

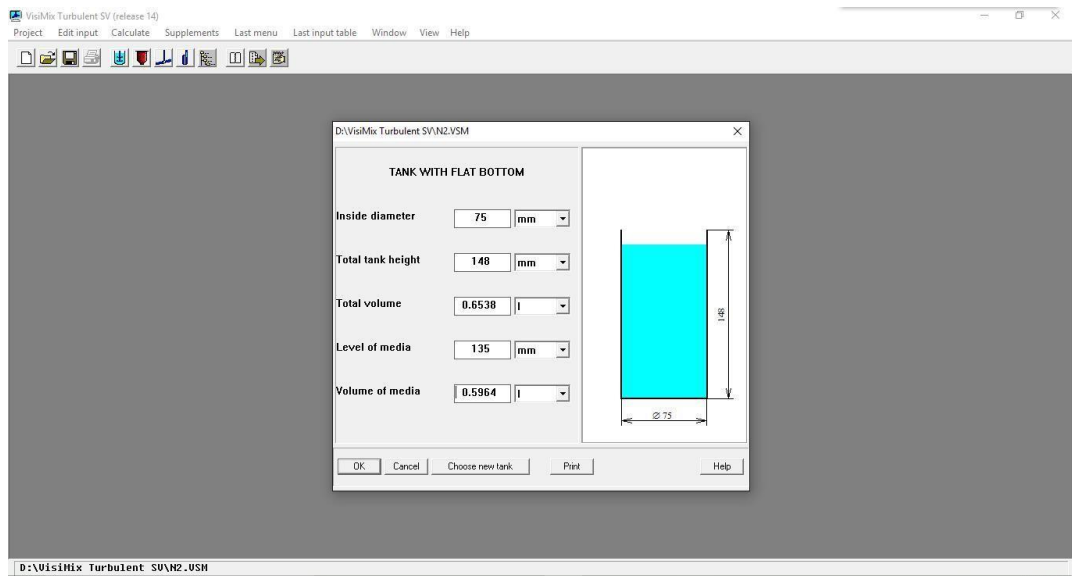


Рис 10 Описание размеров емкости

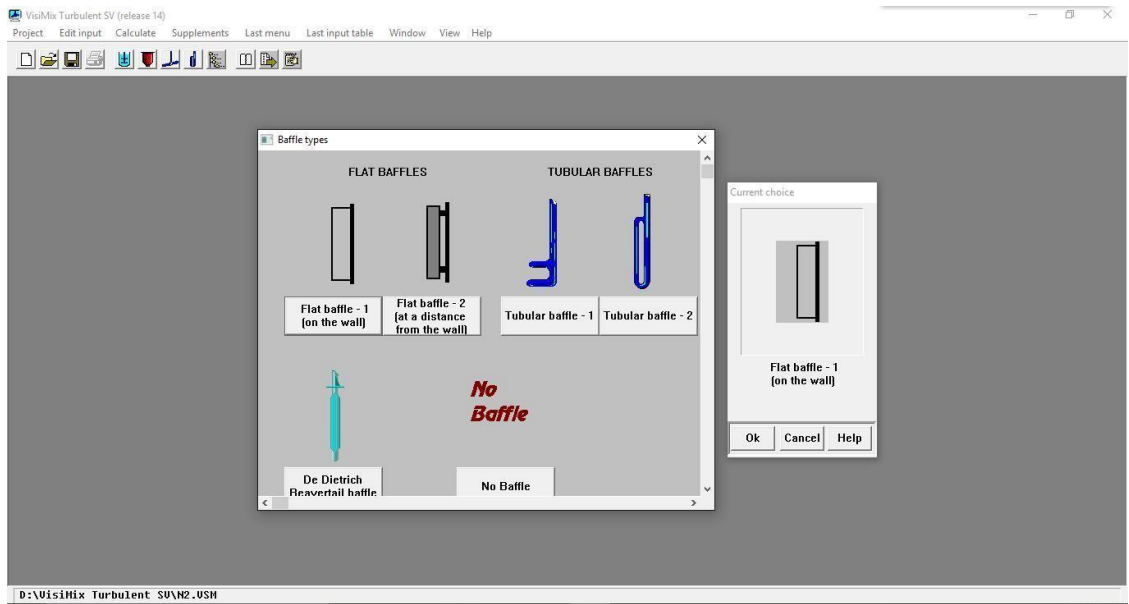


Рис 11 Выбор вида направляющих лопаток

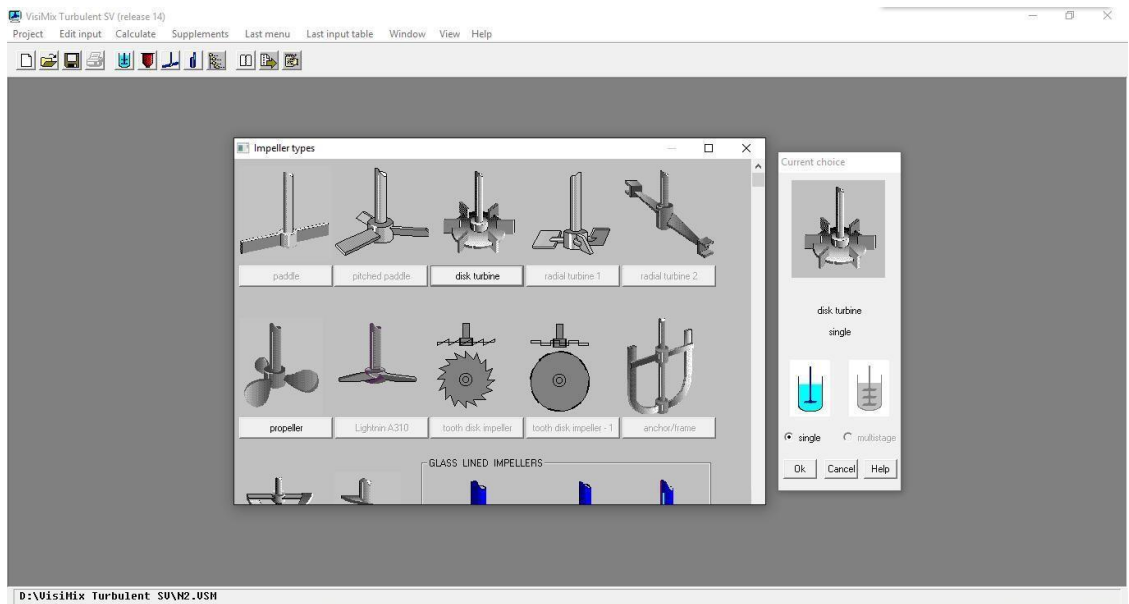


Рис 12 Выбор вида импеллера

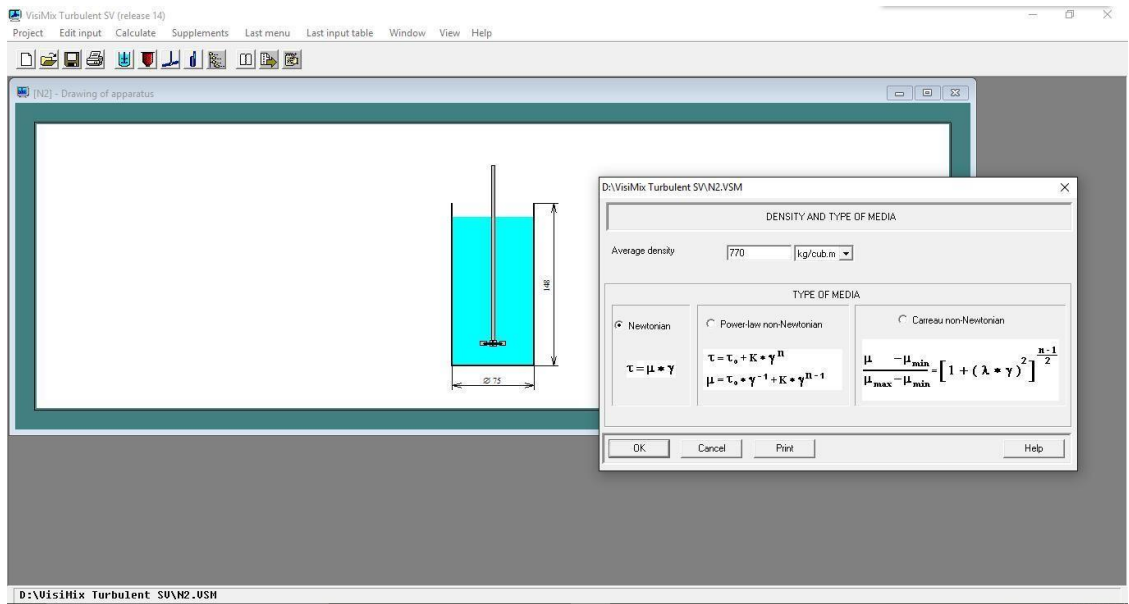


Рис. 13. Выбор среднего значения вязкости и типа среды

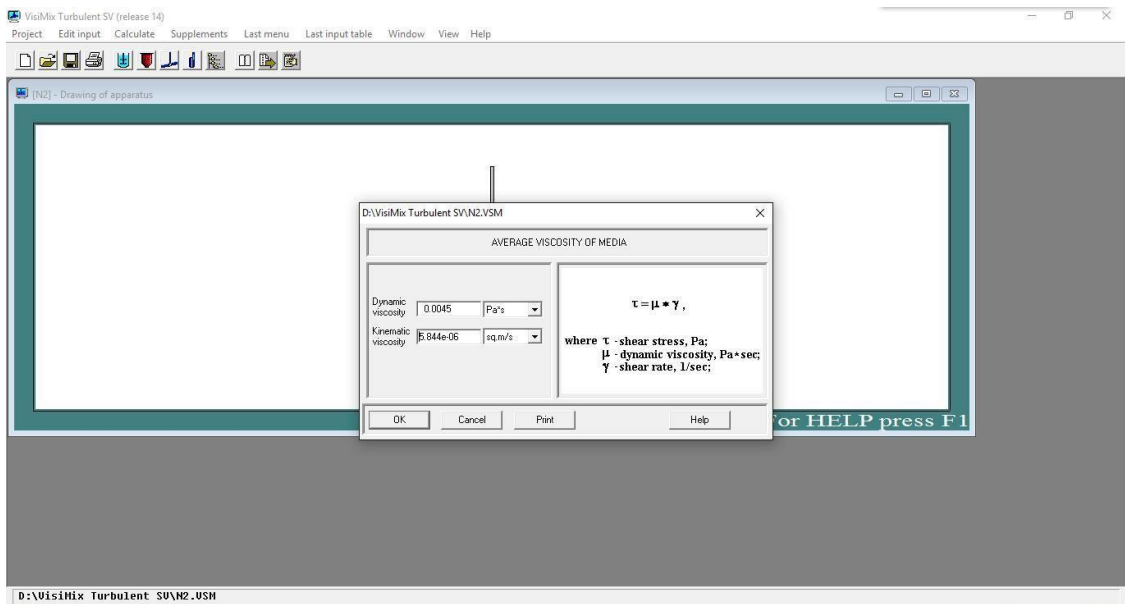


Рис. 14. Выбор среднего значения динамической и кинематической вязкости для выбранного типа среды



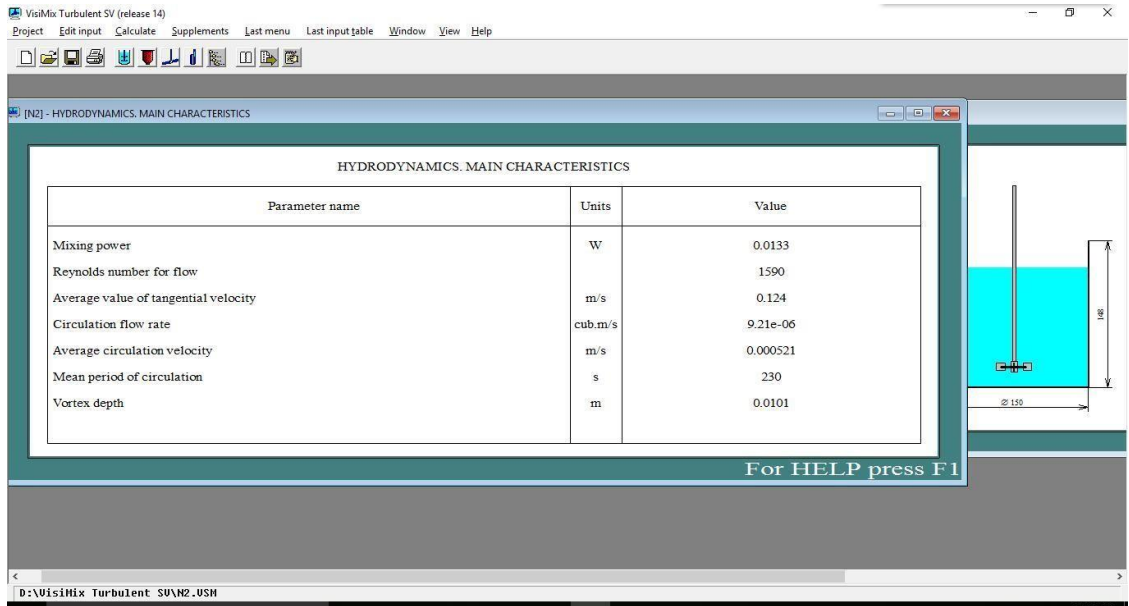


Рис 15. Определение основных гидродинамических параметров

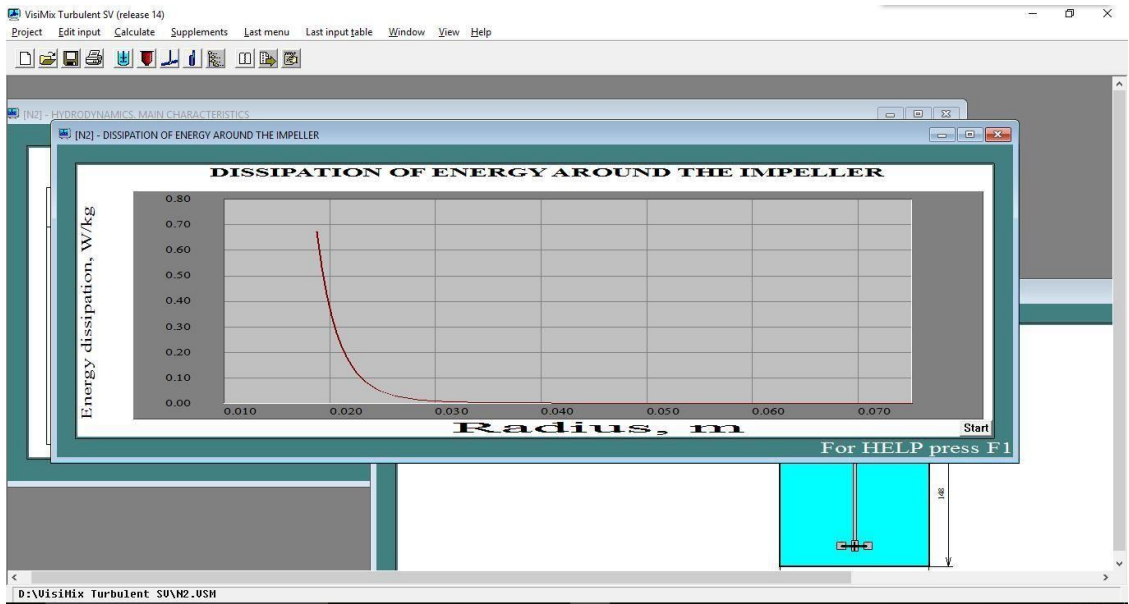


Рис. 16. Рассеяние энергии вдоль радиуса

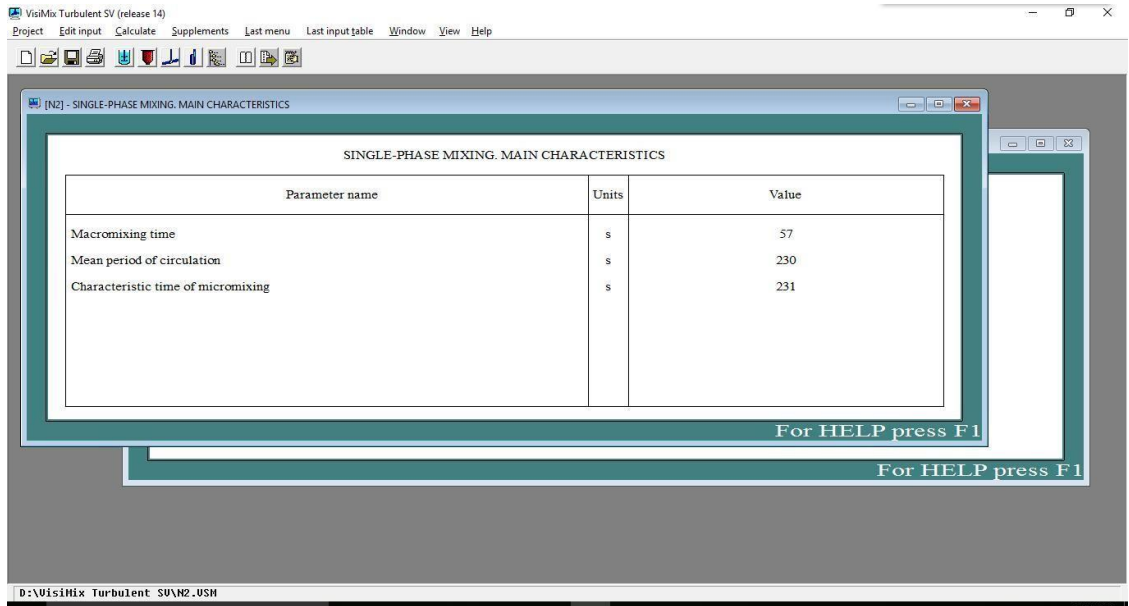


Рис. 17. Определение времени перемешивания, циркуляции и времени микроперемешивания

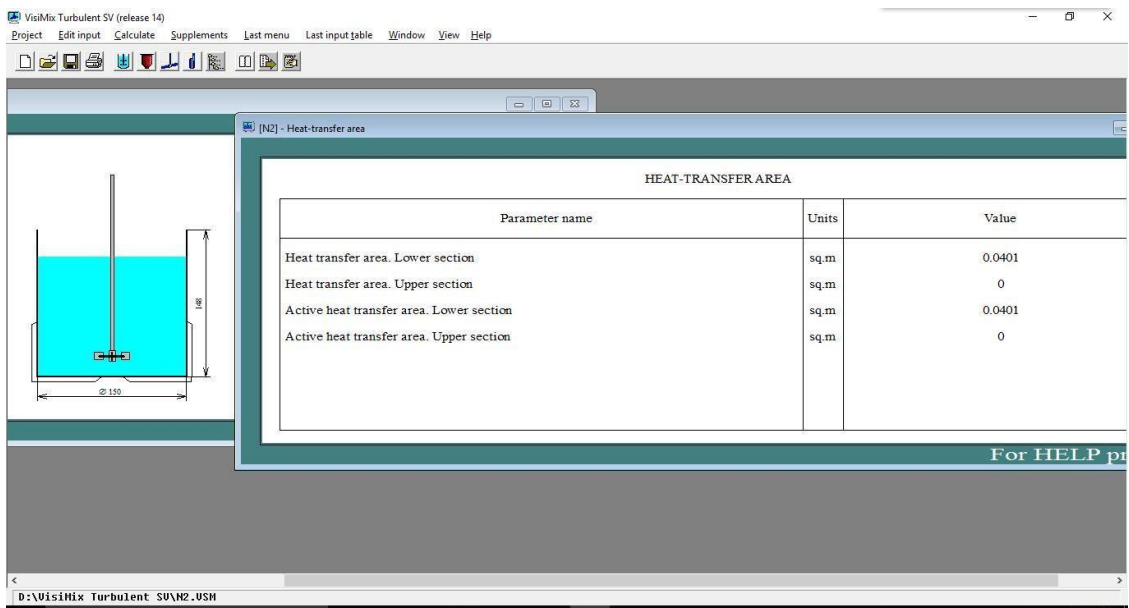


Рис. 18. Определение параметров отвода тепла

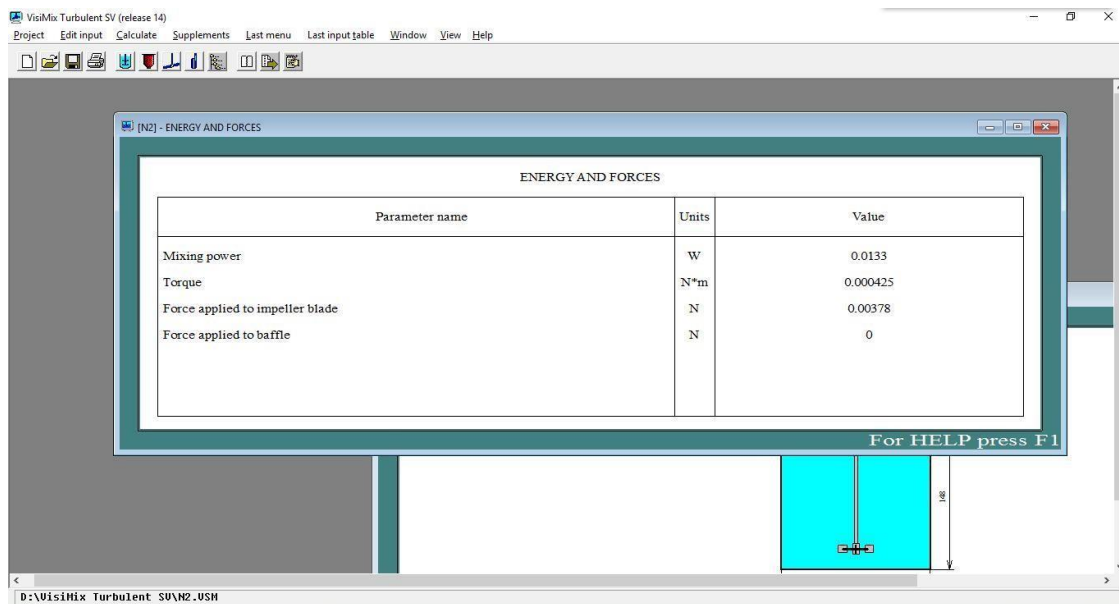


Рис. 19. Определение требуемой мощности, момента, силы, действующей на импеллер и силы действующей на лопатки

Надо отметить что, смешивание достигается перемешиванием и является самой простой и распространённой технологической операцией. Перераспределение крупных фракций веществ происходит на основе спиралевидного циркуляционного течения вокруг мешалки и вертикального потока всего содержимого в ёмкости.

В зоне делителей потока и на концах мешалки могут создаваться турбулентные потоки с зыбью и завихрениями. Создаётся водоворот, внутри которого путём диффузии компоненты перемешиваются на молекулярном уровне. Поперечные движения турбулентного потока также способствуют перемешиванию.

Для оценки перемешивания можно используют показатель  $M$ , который показывает степень равномерного распределения в диапазоне от 0 до 1. При нулевом перемешивании степень смешения  $M$  составляет 0, а при идеальном равномерном распределении – 1. При смешении показатель  $M$  растёт, начиная с 0. Сначала очень быстро, затем нарастание замедляется. И по окончании времени перемешивания он приближается к  $M = 1$ .



Рис. 20

Необходимое время перемешивания для достижения оптимального смешения зависит от вязкости компонентов, от типа используемой мешалки и скорости её вращения. Закономерность одна: чем ниже вязкость смешиваемых компонентов и выше скорость вращения мешалки, тем меньше продолжительность процесса перемешивания.

Коротким временем при вязкости 4000 спз перемешивания лучше справляется чашечная, пропеллерная, проволочная мешалка и мешалка с фрезами.

Таким образом, по результатам вычислительных экспериментов можно сделать вывод что, как показано в программе, с помощью Visimix были определены такие параметры как требуемая мощность, число Рейнольдса, скорость циркуляции, время перемешивания, период циркуляции, а также потерь энергию вдоль радиуса разных типов импеллеров и по тому же методу можно определить и сравнить те же самые параметры остальных типов импеллеров. В итоге из всех вышепоказанных типов импеллеров, было выбрано 4 типа (чашечный, пропеллерный, проволочный, фрезерный) для дальнейшего анализа в эксперименте для оценки эффективности следует проводить эксперимент и моделирование в САЕ-программе.

### 1.2.3 Определение значение вязкости размешиваемой жидкости

#### • Определение вязкости жидкости по методу Стокса

На движущийся шарик в жидкости действуют три силы: сила тяжести  $F_T$ , выталкивающая архимедова сила  $F_A$  и сила сопротивления  $T_C$  (рис. 21). Силу тяжести и выталкивающую силу можно определить следующим образом:

$$F_T = \frac{4 \pi r^3 \rho g}{3}; \quad (1)$$

$$F_A = \frac{4 \pi r^3 \rho_0 g}{3}, \quad (2)$$

где  $r$  - радиус шарика;  $\rho$  - плотность шарика;  $\rho_0$  - плотность жидкости.

Сила тяжести и выталкивающая сила постоянны. Сила сопротивления  $T_C$  прямо пропорциональна скорости и поэтому на начальном этапе она меньше силы тяжести, и шарик падает равноускоренно. При этом сила сопротивления увеличивается и наступает момент, когда все три силы уравновешиваются. Шарик начинает двигаться равномерно:

$$F_T = F_A + T_C \quad (3)$$

Или

$$\frac{4 \pi r^3 \rho g}{3} = \frac{4 \pi r^3 \rho_0 g}{3} + 6 \pi \mu r u, \quad (4)$$

Откуда

$$\mu = \frac{2r^2 g(\rho - \rho_0)}{9u}. \quad (5)$$

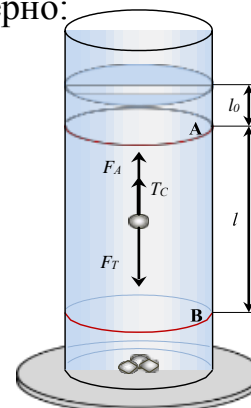


Рис.21 Лабораторная установка

Для определения вязкости жидкости по методу Стокса берётся высокий цилиндрический сосуд с исследуемой жидкостью (рис. 21). На сосуде имеются две кольцевые метки А и В, расположенные на расстоянии  $l$  друг от друга. Расстояние между метками можно изменять. Уровень жидкости должен быть выше верхней метки на  $l_0 = 4...5$  см, чтобы к моменту прохождения шарика мимо верхней метки его скорость можно было считать установившейся. При этом, поскольку движение шарика равномерное, его перемещение определяется формулой (4).

Бросая шарик в сосуд, отмечают по секундо- меру время  $t$  прохождения шариком расстояния  $l = AB$  между двумя метками.

Преобразуем формулу (3) путём подстановки выражения для скорости движения  $u = l/t$  и замены радиуса шарика  $r$  диаметром  $d$ .

$$\mu = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2t}{18l}. \quad (6)$$

Уравнение (6) справедливо лишь тогда, когда шарик падает в безграничной среде. Если шарик падает вдоль оси трубки радиусом  $R_0$ , то приходится учитывать влияние боковых стенок. Поправки в формуле Стокса для такого случая теоретически обосновал Ладенбург.

При падении шарика радиусом  $r$  в цилиндрической трубе радиусом  $R_0$ , высотой  $h$  учёт влияния границ даёт

$$\mu = \frac{2r^2 g(\rho - \rho_0)}{9v(1 + 2.1 \frac{r}{R_0})(1 + 1.33 \frac{r}{h})} \quad (7)$$

Таким образом, зная плотности материала шарика и жидкости, радиусы шарика и сосуда, скорость установившегося движения шарика  $v$ , по формуле (7) можно вычислить динамическую вязкость жидкости.

- **Проведение эксперимент**



Рис. 22 эксперимент по исследуемой жидкости

**Данные по лабораторной установке и исследуемой жидкости**

Параметр	Ед. изм.	Значение
Плотность жидкости, $\rho_0$	кг/м <sup>3</sup>	$1.300 \times 10^3$
Плотность материала шарика, $\rho$	кг/м <sup>3</sup>	$7.812 \times 10^3$
Радиус сосуда, $R_0$	м	0.0425
Расстояние между метками, $l$	м	0.115

## Опытные данные и результаты расчёта вязкости

№ п/п	Линейные размеры шарика		Время движения шарика $t$ , с	Скорость движения шарика $u$ , м/с	Динамическая вязкость жидкости $\mu$ , Па·с
	$d$ , мм	$r$ , м			
1	3,18	0,00159	13	0,008846154	3,86
2	2,37	0,001185	23,5	0,004893617	3,97
3	3,96	0,00198	8,5	0,013529412	3,84
4	2,37	0,001185	24	0,004791667	4,05
5	4,86	0,00243	5	0,023	3,32
6	3,16	0,00158	13	0,008846154	3,82
7	2,37	0,001185	25	0,0046	4,22
8	2,37	0,001185	25	0,0046	4,22
9	2,37	0,001185	24	0,004791667	4,05
10	3,18	0,00159	13	0,008846154	3,86

- **Результат, полученный после обработки опытных данных**

Среднее значение динамической вязкости  $\mu$ , Па·с

$$\Delta\mu = 3.93 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Так как 1 паскаль-секунда = 1000 сантипуаз,

Вязкость экспериментального геля равна 3930 сПз.

- **Проверка результата**

Для проверки точности результатов измерения вязкости геля следует повторить измерения с жидкостью, чья вязкость известна. В данном случае было выбрано индустриальное масло И-20А для проверки предыдущего эксперимента.

- **Проведение эксперимента для масла марки И-20А**

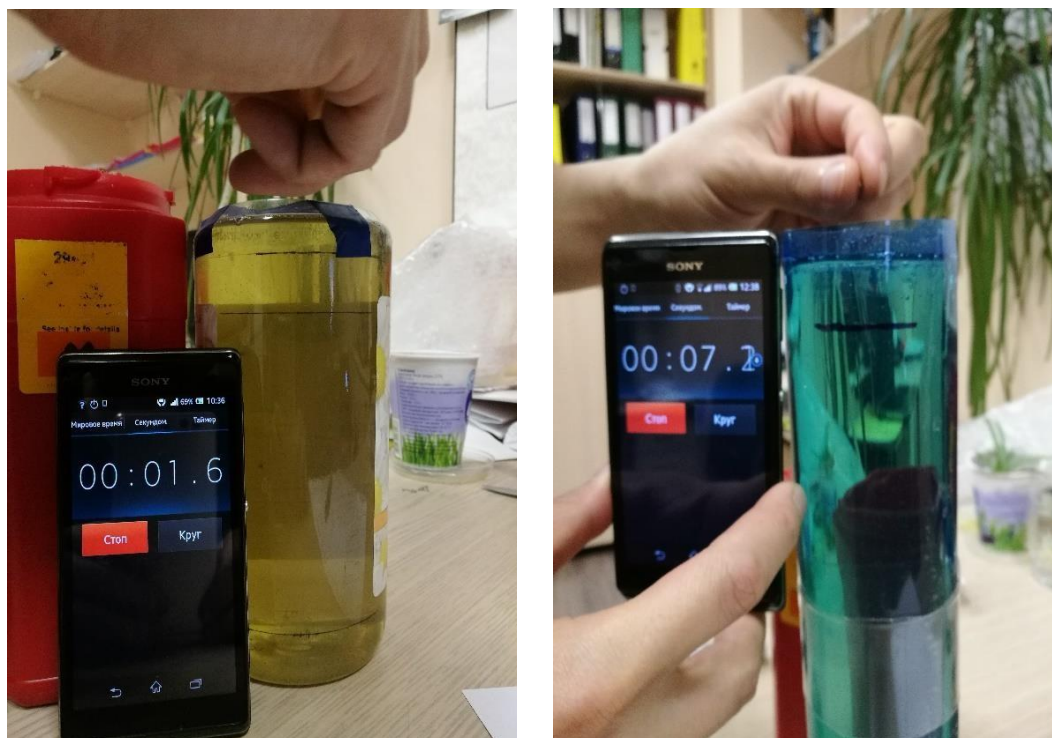


Рис. 23 эксперимент по И-20А

### Данные по лабораторной установке и жидкости И-20А

Параметр	Ед. изм.	Значение
Плотность жидкости, $\rho_0$	кг/м <sup>3</sup>	$0.890 \times 10^3$
Плотность материала шарика, $\rho$	кг/м <sup>3</sup>	$7.812 \times 10^3$
Радиус сосуда, $R_0$	м	0.0315
Расстояние между метками, $l$	м	0.250

### Опытные данные и результаты расчёта вязкости

№ п/п	Линейные размеры шарика		Время движения шарика $t$ , с	Скорость движения шарика $u$ , м/с	Динамическая вязкость жидкости $\mu$ , Па·с
	$d$ , мм	$r$ , м			
1	2,37	0,001185	1,15	0,217391304	0,08979
2	2,37	0,001185	1,2	0,208333333	0,09370
3	2,37	0,001185	1,1	0,227272727	0,08589
4	2,37	0,001185	1,15	0,217391304	0,08979
5	2,37	0,001185	1,15	0,217391304	0,08979



- **Обработка опытных данных**

Среднее значение динамической вязкости  $\mu$ , Па·с

$$\Delta\mu = 0,08979 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

- **Сравнение со стандартным значению индустриального масла**

Таблица 34

Кинематическая вязкость смазочных масел при различной температуре (по данным Г. И. Фукса, И. А. Митрофановой и Т. Г. Михайловой [69])

Масло	Вязкость в сантистоксах при						
	0°	5°	20°	50°	100°	150°	180°
Веретенное 3 . . . . .	438,8	—	96,18	20,65	4,89	—	—
Автол 6 селективный . .	867,3	—	170,9	32,19	6,68	3,66	2,69
Автол 6 серноокислотный	1934	1085	284,7	43,61	7,79	4,07	2,96
Автол 10 селективный (обр. № 10) . . . . .	3369	1899	477,5	67,91	10,63	5,32	3,72
Автол 10 селективный (обр. № 9) . . . . .	6452	3231	650,9	83,17	12,10	5,84	4,03
Авиационное масло МЭС (обр. № 4) . . . . .	4482	2434	614,4	93,95	14,62	7,25	4,99
Авиационное МЭС (обр. № 3) . . . . .	4597	2508	674,7	100,9	15,33	7,47	5,18
Авиационное МЗ . . . . .	4549	2490	641,4	95,21	14,37	7,13	4,92
Автол 18 серноокислотный	15720	6419	1138	128,8	15,89	7,33	5,00
Авиационное МС . . . . .	10109	5110	1094	150,2	20,15	9,70	6,58
Авиационное МК (обр. № 6) . . . . .	12399	7198	1429	177,1	22,25	10,25	6,85
Авиационное МК (обр. № 7) . . . . .	12734	7178	1638	195,9	23,67	10,66	7,13

Из таблицы видно, что при температуре 20°С, кинематическая вязкость масла Веретенного 3 равна 96,18 сСт. Таким образом, при плотности 890 кг/м<sup>3</sup> динамическая вязкость индустриального масла И-20 будет равна:

$$\mu_d = \mu_k \cdot \rho = 0,08544 \text{ Па} \cdot \text{с},$$

По сравнению с опытным значением  $\Delta\mu = 0,08979 \text{ Па} \cdot \text{с}$ , погрешность эксперимента:

$$\Delta = \frac{\Delta\mu - \mu_d}{\Delta\mu} \cdot 100\% = 4,84\%$$

Таким образом, проверка результата выполнена, можно считать, что определенное значение вязкости экспериментального геля, которое равно 3930 сПз было верным с допустимой погрешностью.

## 1.2.4 Определение конструкции импеллеров

В Visimix, грубые ошибки по размерам импеллеров уже были автоматически отредактированы, поэтому после анализа в Visimix, в соответствии с расчетными результатами, приводит к опытным диапазонам размеров мешалок в приложении.

## **Изготовление импеллеров**

Для проведения эксперимента по определению эффективности перемешивания были изготовлены различные виды импеллеров. Все импеллеры изготовлены из стали 3 для лучшей свариваемости деталей импеллеров, работающих при переменных нагрузках в интервале от  $-40$  до  $+425$  °С.

### **Конструкция чашечного импеллера**

Чашечный импеллер состоит из трех чашек, расположенных равномерно вокруг оси вращения. Чашками и вращающийся вал соединены перемычками круглого сечения. Метод соединения между ними – сварка.

### **Конструкция проволочного импеллера**

Проволочный импеллер, как и чашечный, состоит из трех рамок, расположенных по окружности с шагом в 120 градусов. Каждая рамка состоит из двух полых частей квадратного сечения (один большой и один маленький), изготовленных из листовой стали с учетом простоты изготовления. Между квадратами и вращающим валом будут также три перемычки.

### **Конструкция фрезерного импеллера**

Фрезерные мешалки выгодно отличаются универсальностью и успешно применяются в процессах тонкого измельчения и перемешивания твердых тел и жидкостей в различных комбинациях, что позволяет получать суспензии, эмульсии и пасты высокой степени однородности. Для простоты изготовления фрезерный импеллер представляет собой круглый лист стали с восемью треугольными выступами, отогнутыми перпендикулярно к горизонтальной плоскости листа фрезы.

### **Конструкция пропеллерного импеллера**

Пропеллерные промышленные или лабораторные мешалки состоят из вала, на котором закрепляется импеллер в виде лопастей разного профиля. Большим преимуществом пропеллерных мешалок является возможность непосредственного жесткого крепления мешалки к электродвигателю, что позволяет сделать конструкцию энергоэффективнее. Для увеличения качества перемешивания вал мешалки располагают под углом к вертикали в  $30^\circ$ .

## **1.2.5 Моделирование процесса перемешивания в ПО ANSYS**

Для точнее оценки эффективности трех видов импеллеров необходимо

провести моделирование в CAE-программе. В данной работе моделирование было выполнено с использованием программ Ansys Fluent v17.2 и Ansys CFX v17.2.

Перемешивание в жидкости используется во много отраслях. Повышение эффективности перемешивания является объектом исследования многих инженеров. В этой части данной работы исследовано одно звено анализа эффективности перемешивании:

1. С использованием инструмента Ansys Mesh сделана сетка конечных элементов для импеллеров и жидкой среды.
2. С использованием инструмента Ansys CFD выполнено моделирование в жидкой среде для оценки однородности распределения жидкости.
3. Моделирование проведено для трех видов импеллеров: пропеллерного, чашечного и фрезерного. Перемешивание выполнялось при некоторой идеальной скорости, определяемой в физическом эксперименте.

Моделирование для трех типов импеллеров выполнены при условиях:

- Скорость вращения пропеллерного импеллера: 500 об/мин;
- Скорость вращения чашечного импеллера: 500 об/мин;
- Скорость вращения фрезерного импеллера: 800 об/мин;
- Вязкость перемешиваемой среды: 4000 сПз.

✓ Проверка сеточной сходимости испытуемых моделей

### ***Анализ сходимости по сетке***

Очень важным критерием при численном расчете той или иной задачи является сеточная сходимость, т.е. независимость решения от шага сетки. Таким образом, если с уменьшением шага сетки решение не меняется, или меняется незначительно, то можно говорить о независимости решения от размера шага сетки, следовательно, решение является корректным. Анализ сходимости по сетке так же поможет найти оптимальный шаг, при котором потребуются относительно небольшие вычислительные ресурсы, и при этом, не пострадает качество решения. Поэтому для проверки перед симуляцией импеллеров важно проверить качество сетки. Для его проверки следует наблюдать границы контакта импеллер-жидкость: т.е. все границы раздела должны быть гладкие, четкие без закручиваний, разрывов и искажения. При плохом качестве сетки, расчет в “Ansys-Workbench-Solution” не сходится или вовсе не дает результата. При этом, в большинстве случаев следует редактировать 3D-модель в “Ansys-Workbench-Geometry” и устранять все существующие трещины в модели.



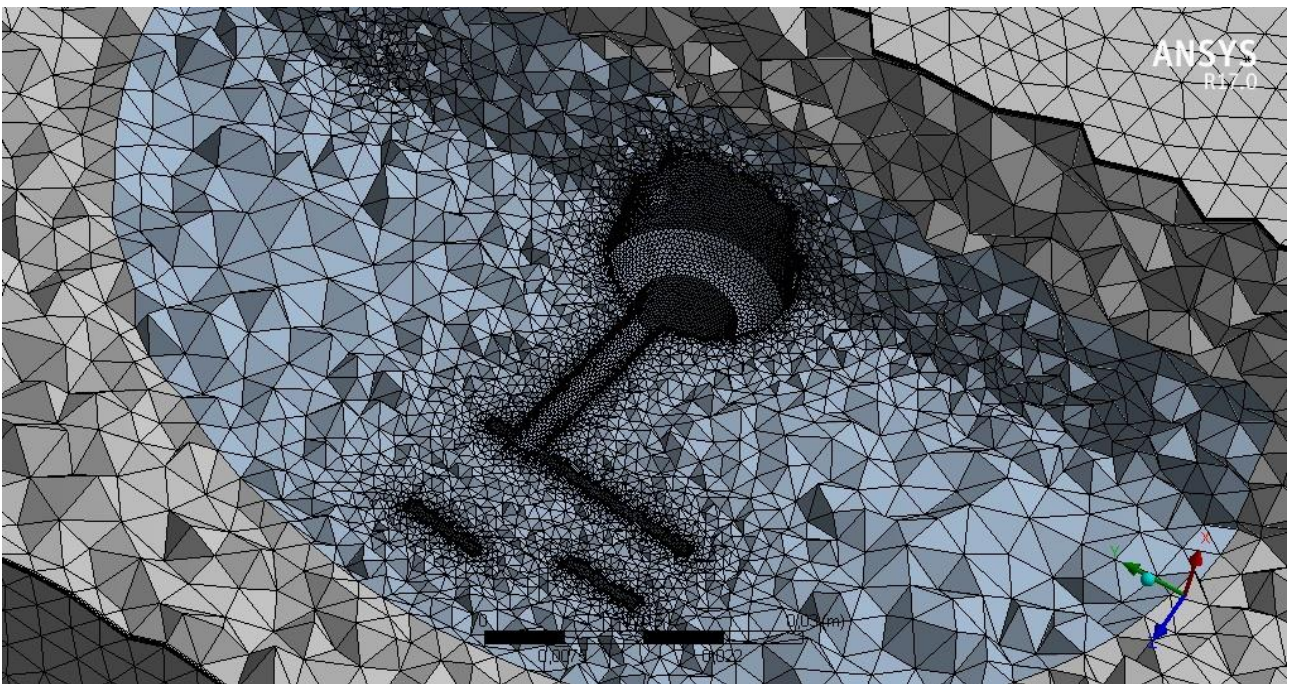
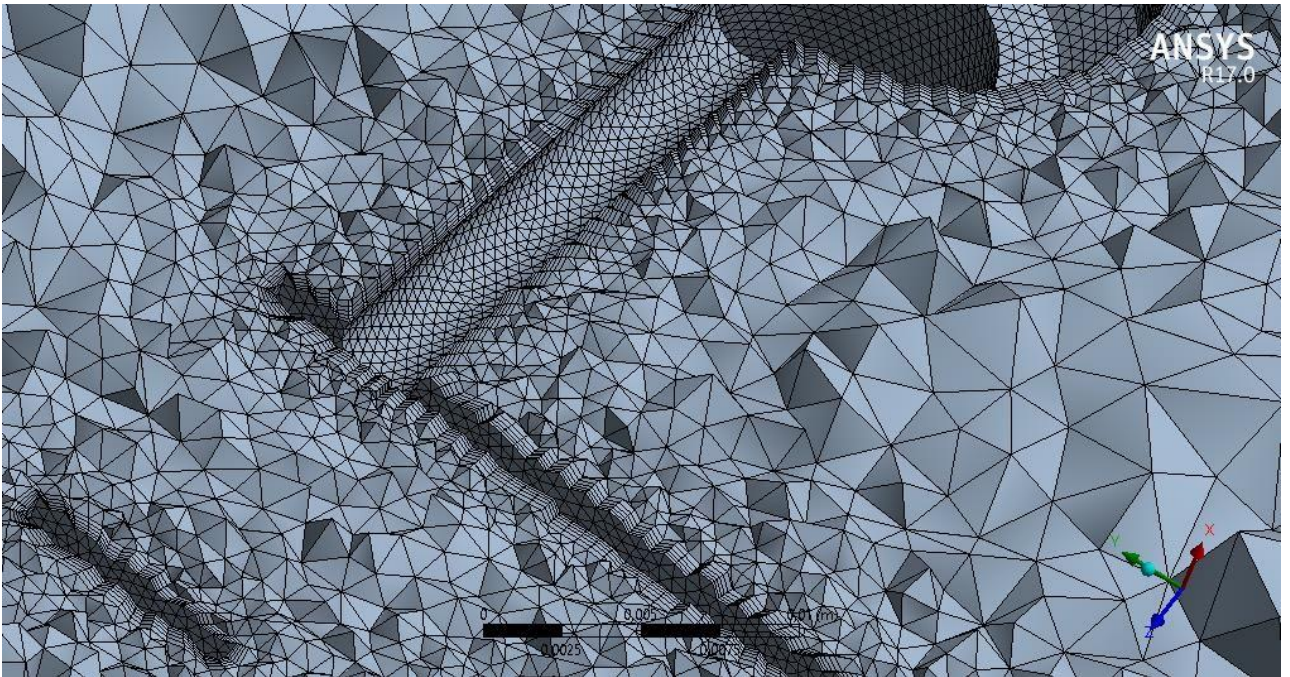


Рис. 24 Проверка качества сетки пропеллерного импеллера

Необходимо проверить все границы между жидкостями и импеллерами перед расчетом. Все слоя, составляющие предельные границы, должны быть четко видно. В данном случае, границы всех типов импеллеров состоят из пяти слоев, которые ниже показаны четко.



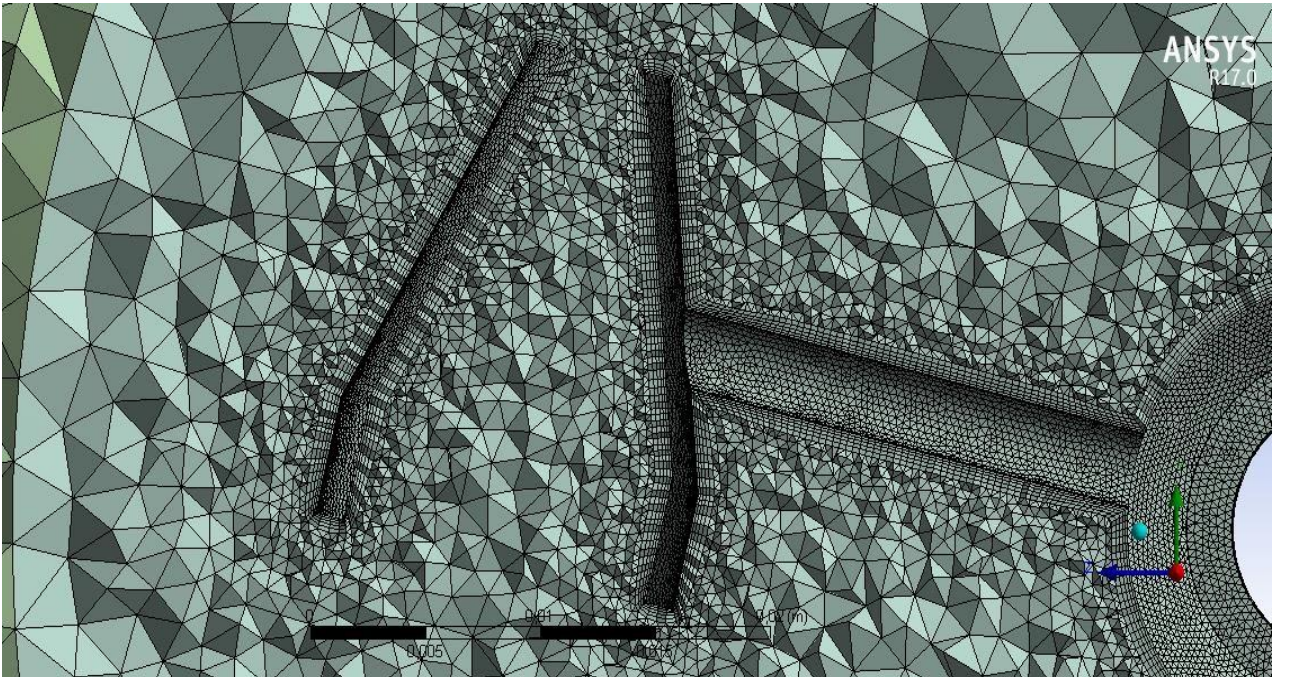
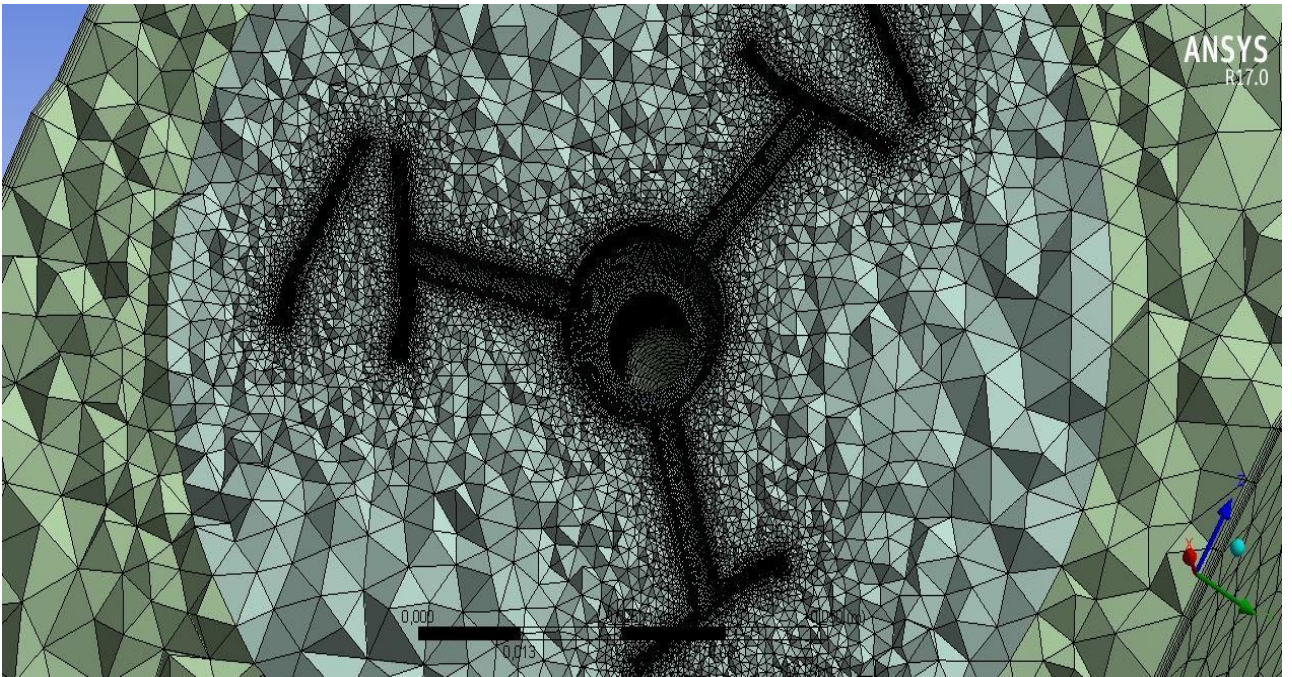


Рис25. Проверка качества сетки чашечного импеллера



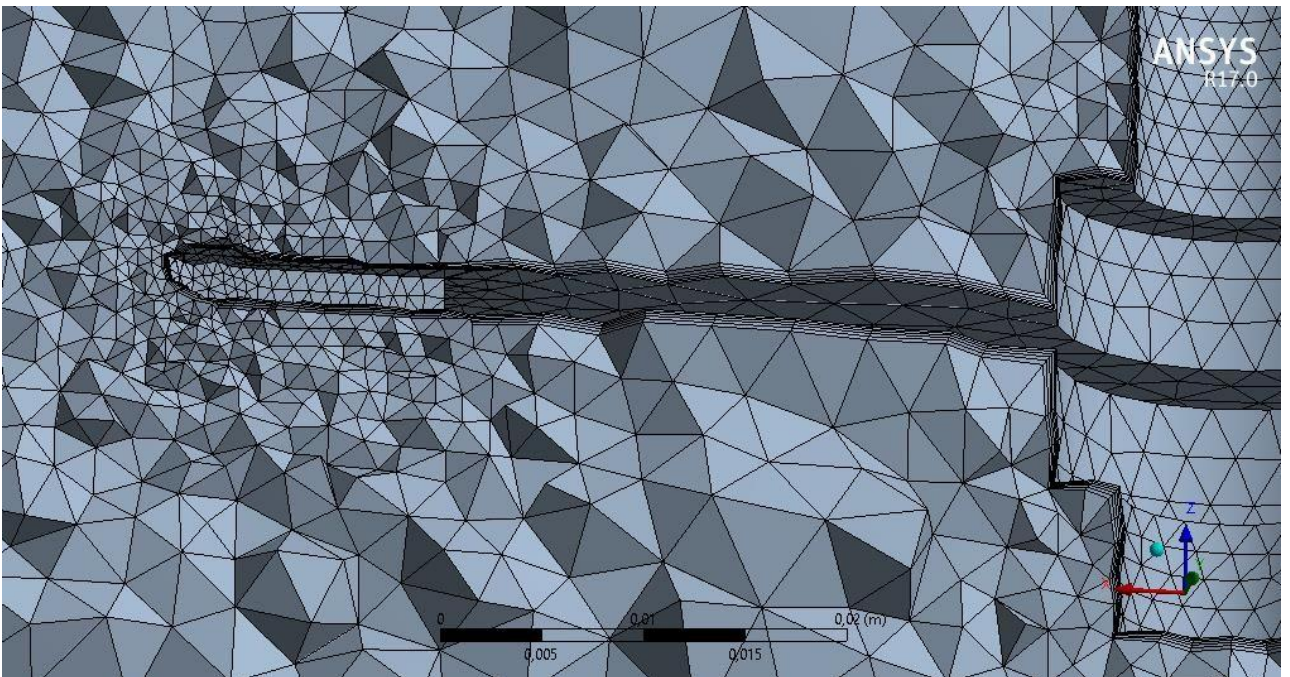
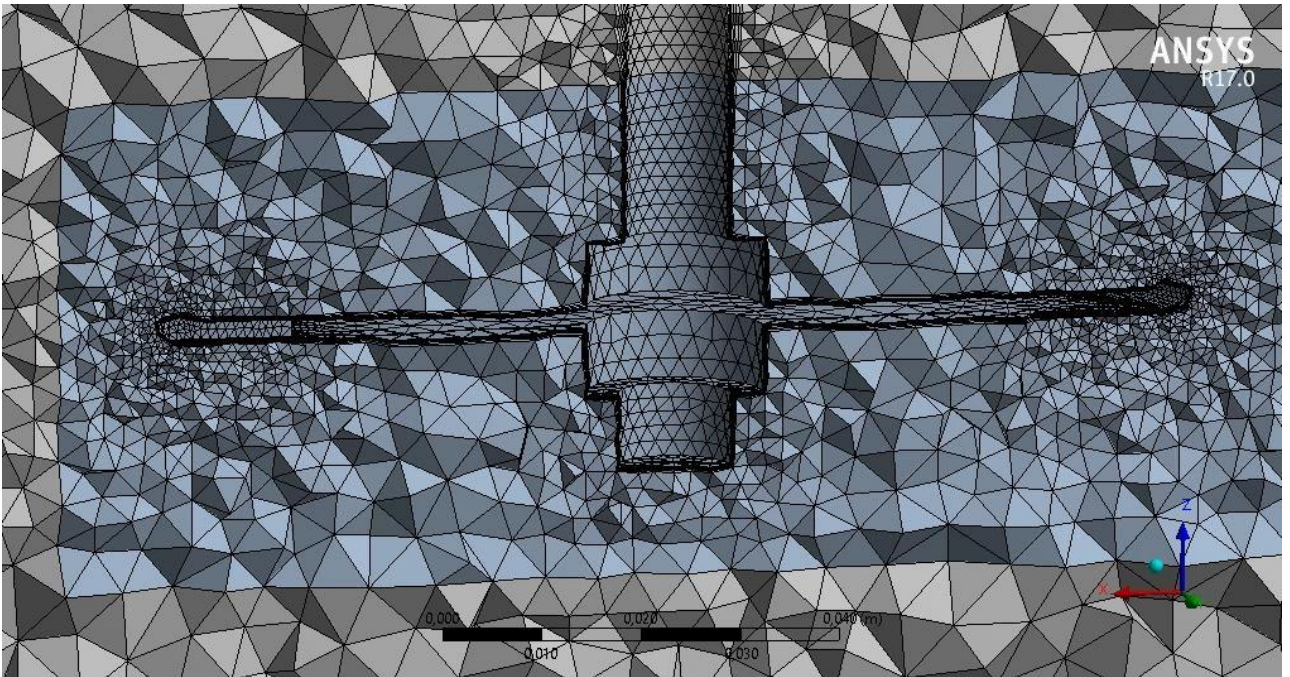


Рис26. Проверка качества сетки фрезерного импеллера

### *Процедура расчета*

На расчетную модель была наложена неструктурная сетка, построенная универсальным методом послойной укладки тетраэдрических элементов в объем. Расчетная модель состоит из около 2 000 000 элементов. При построении сетки использовалась размерная функция, которая позволила наложить более детальную сетку на области вблизи поверхностей мешалки, так как именно в этих областях прогнозируются наибольшие градиенты скорости и давления.

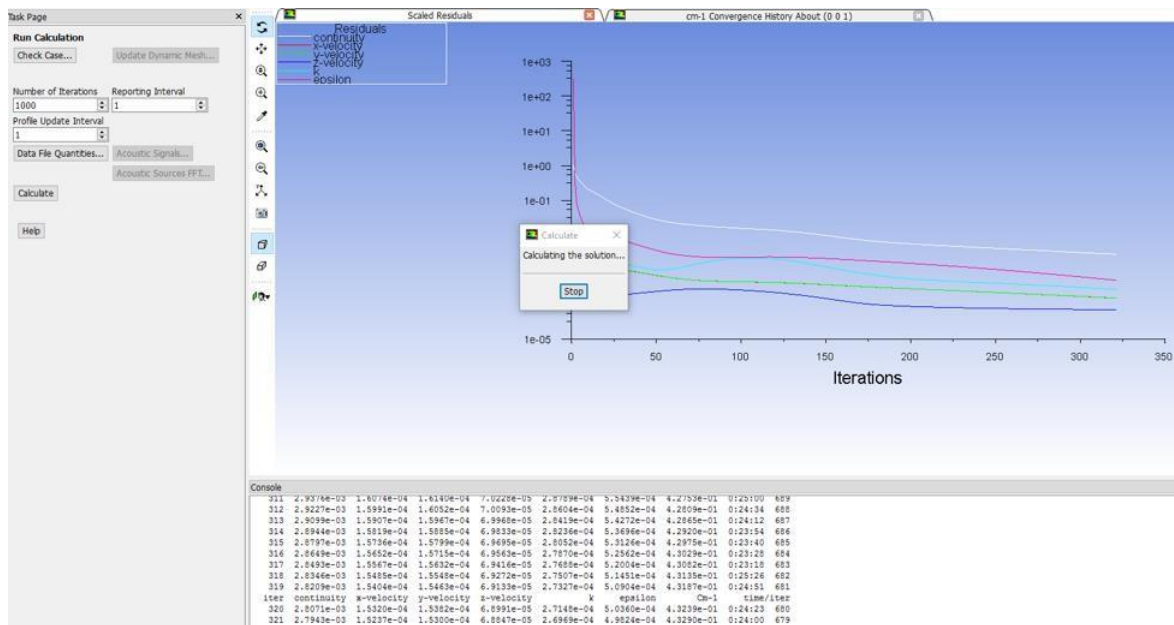


Рис.27 Проверка сходимости

Проверка сходимости осуществляется методом конечной итерации. На рисунке видно, что невязок скоростей во все три стороны (X, Y, Z) между двумя итерациями становится все меньше и меньше при увеличении числа итерации, что показывает в след за вычисление, погрешность решения симуляции скорости жидкости уменьшается.

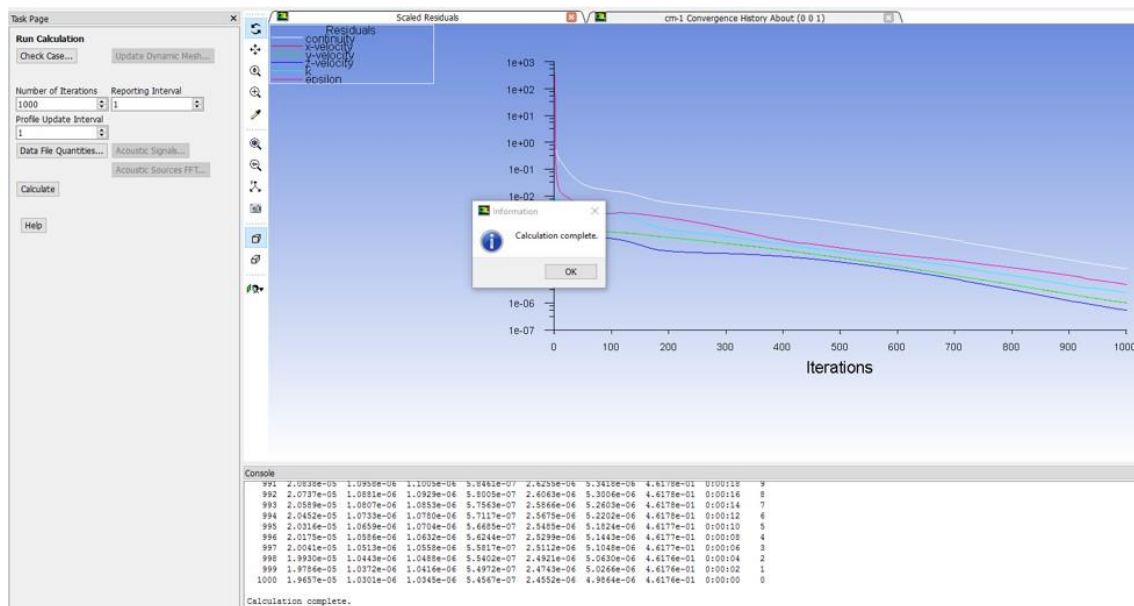


Рис.28 Сходимость невязок

Расчет моделирования осуществляется методом итераций. Минимальное значение невязок было выбрано  $\Delta=1 \cdot 10^{-6}$ . Для достижения заданной точности потребовалось около 1000 итераций. Расчет на ЭВМ с двухъядерным процессором Intel® Core™ i5 CPU M460 @ 2.53GHz и 4 Гб ОЗУ проводился около 2 часов.



Следовательно, так как в данном случае для всех трех типов импеллеров остаточная ошибка симуляции сходится на 1000 итерации, можно считать, что следующие результаты верны.

### ✓ Моделирование пропеллерного импеллера

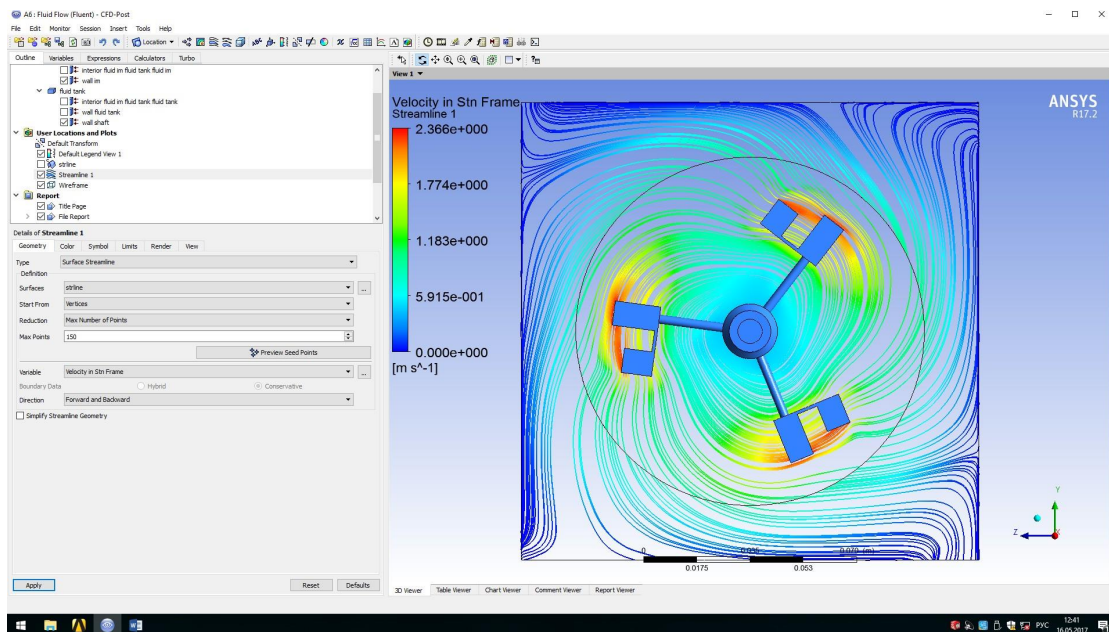


Рис. 29. Вид сверху пропеллерного импеллера

На рисунке видно, что основные массивы линий потока жидкости – синие, что обозначают низкую скорость движения потока. А только линий около самого импеллера существует большую линейную скорость (красную) около двух метра в секунду. В принципе в самом центре евро-куба, плотность линий потока нормальные, но между стенками евро-куба и импеллера плотность линий незамедлительно уменьшается.

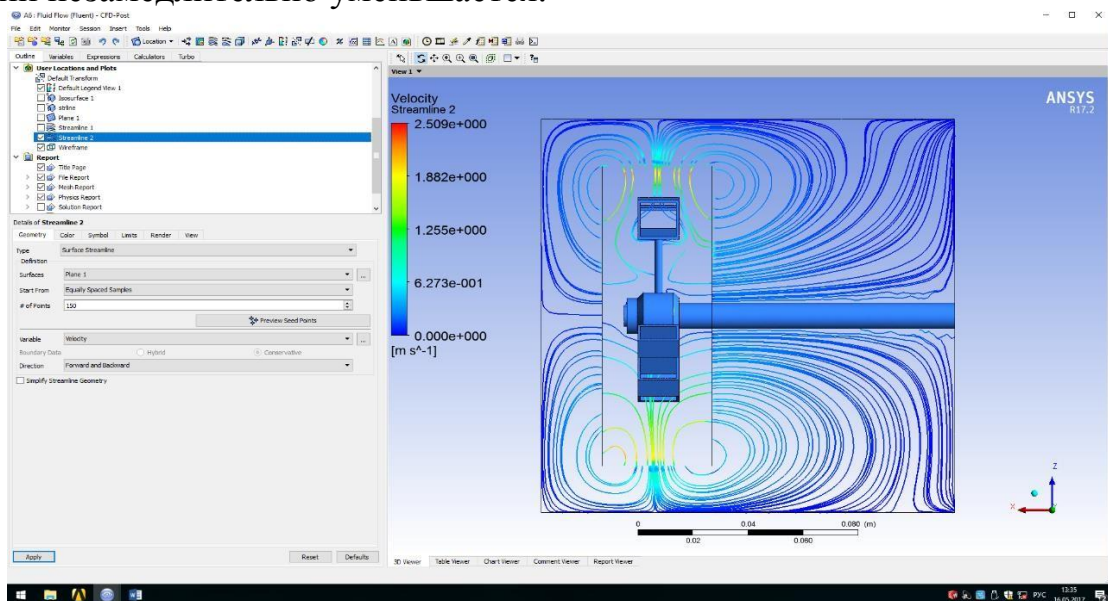


Рис. 30. Вид сбоку пропеллерного импеллера



Здесь на рисунке 30 хорошо видно с помощью масштаба, что скорость движения линий потока быстро уменьшается вдоль вала. Голубые линии, у которых средняя линейная скорость около 0.6 метра в секунду, расположены только в приблизительно 40мм в осевую сторону.

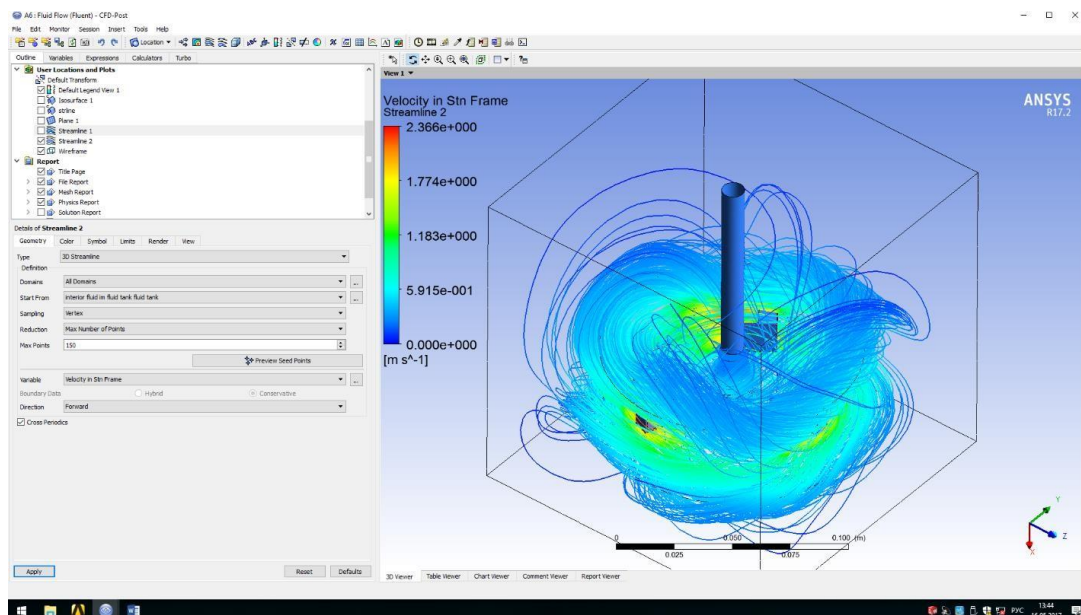


Рис. 31. Трехмерное изображение пропеллерного импеллера

Как показано на Рис.31, цвет большинства линий потока, находящихся в евро-кубе, темно-синий, синий при перемешивании с пропеллерными импеллерами. На углах расположенное количество линий потока мало. В середине евро-куба основной цвет-зеленый-голубой, что означает средняя скорость перемешиваемой жидкости от 0.6 до 1 м/с.

✓ Моделирование чашечного импеллера

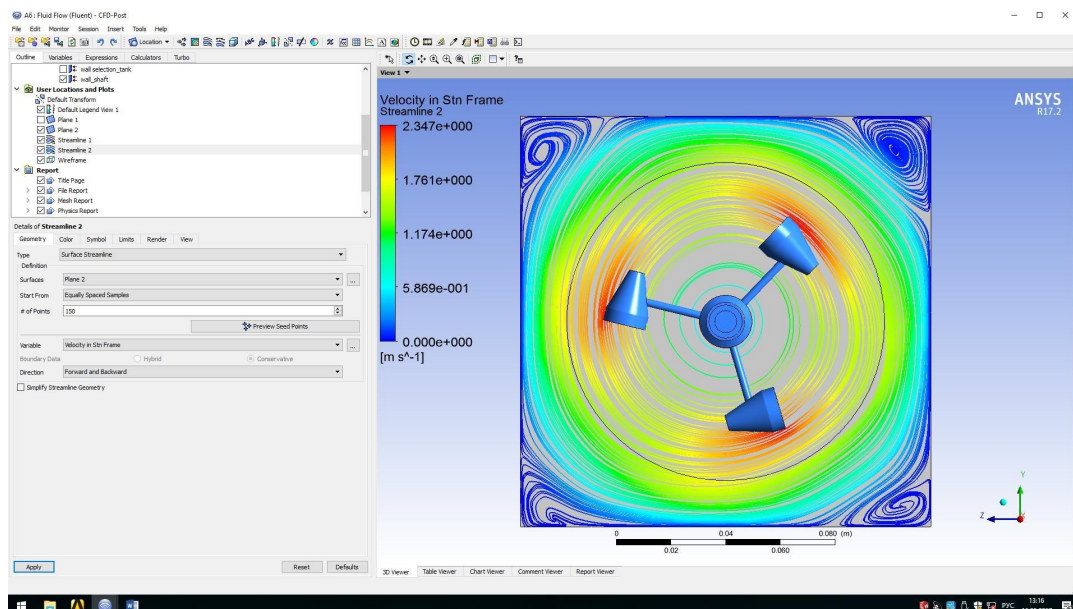


Рис. 32. Вид сверху чашечного импеллера

На рисунке видно, что основные массивы линий потока жидкости не синие, как у пропеллерного, а желтые-зеленые, что обозначают, что по сравнению с предыдущим импеллером, чашечные импеллера имеют выше скорость движения потока: около 1.6м/с. Тем более, линии потока со высокой скоростью расположены не только около самого импеллера, они расположены до стенок евро-куба. Самая большая скорость (красная) в данном случае около 2.5 метра в секунду. Также на Рис.32 четко видно, что при использовании чашечного импеллера очень эффективно перемешивает вязкие гель, особенно на углах. Кроме того, плотность линий потока значительно, и сравнительно равномерна, она практически остается на том же уровне вдоль радиуса.

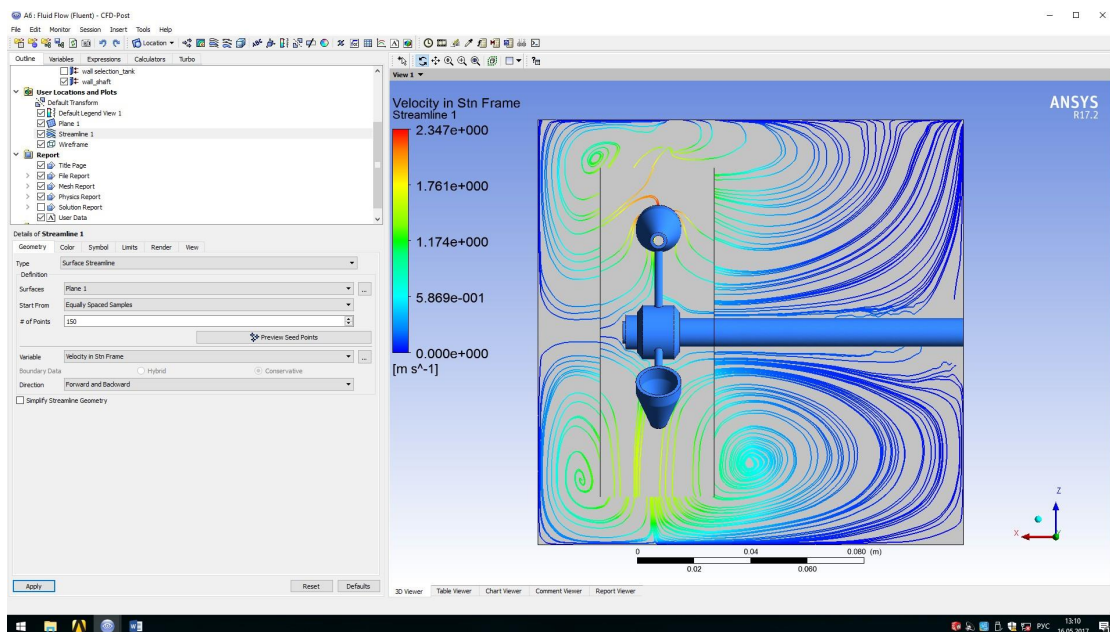


Рис. 33. Вид сбоку чашечного импеллера

Здесь на рисунке 33 видно, что в половине объема покрашено желтым-зеленым цветом, больше 80мм вдоль вала покрашено желтым-зеленым-голубым цветом. А это уже как минимум 0.6 м/с, а средняя линейная скорость соответственно уже больше 1 м/с.

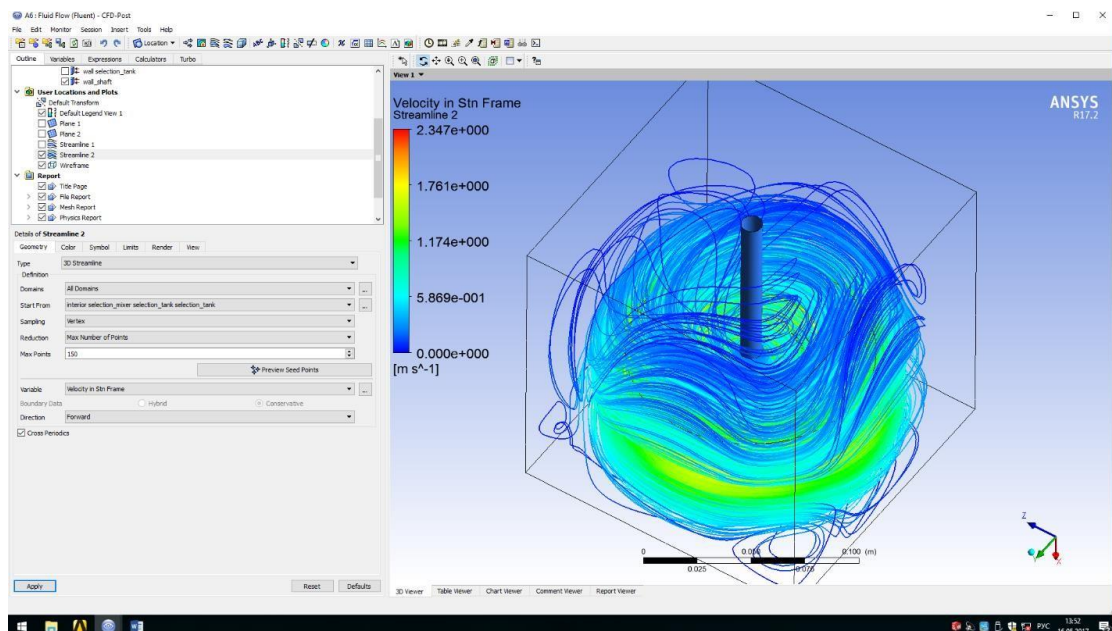


Рис. 34. Трехмерное изображение чашечного импеллера

Как показано на Рис.34, цвет большинства линий потока, находящихся в евро-кубе зеленый, светло-синий и синий при перемешивании с чашечными импеллерами. В углах расположенные также линии потока жидкости. В середине евро-куба основной цвет-желтый-зеленый-голубой, что означает средняя скорость перемешиваемой жидкости около 1 м/с. Кроме того, при наблюдении, сочетающем Рис.33, можно заметить, что формируется воронку около вала сверху, соответствует наблюдаемой картинкой при физическом эксперименте.

✓ Моделирование фрезерного импеллера

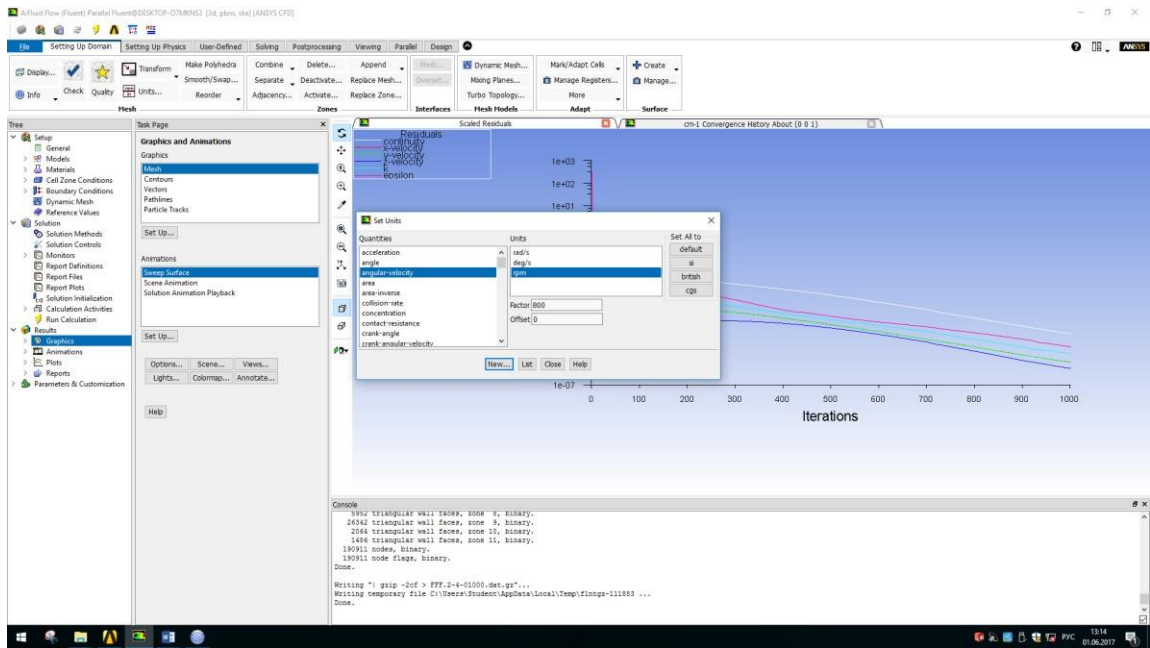


Рис.35. изменение оптимальной скорости (800об/мин) перемешивания для фрезерного импеллера

Расчет моделирования фрезерного импеллера выполняется при ее оптимальной скорости, определяемой уже в физическом эксперименте, в единице  $\text{rpm}$ , в данном случае для фрезерного импеллера, выбранная скорость—800 оборотов в минут.

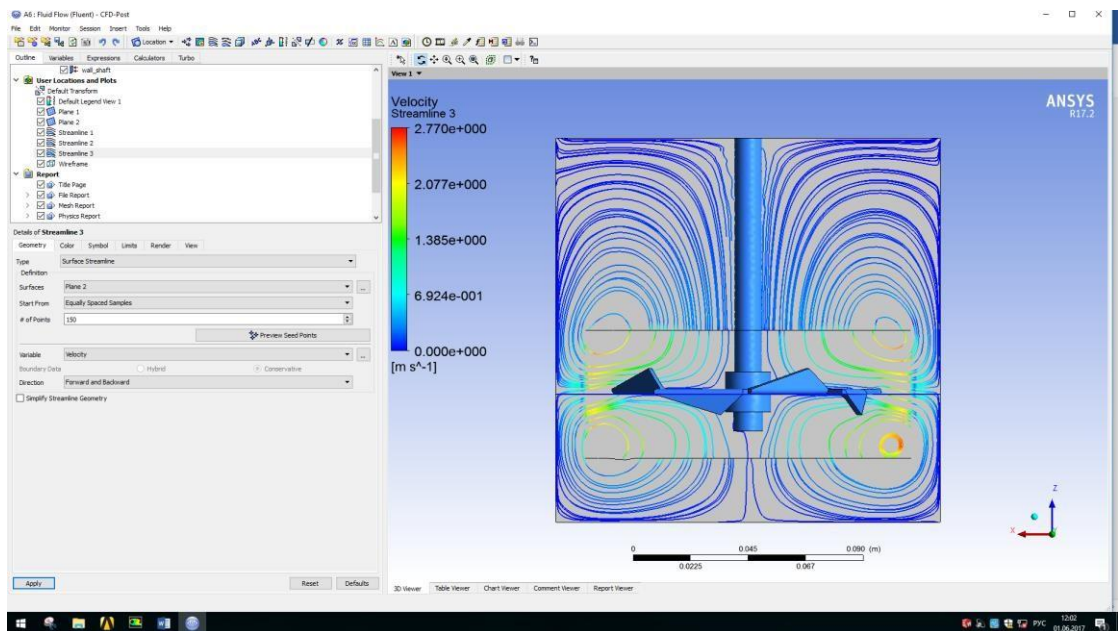


Рис. 36. главный вид фрезерного импеллера

На рисунке 33 с помощью масштаба видно, что область перемешивания незначительная: линии потока со желтым-зеленым-голубым цветом находятся только около 40мм по высоте. В большинстве месте евро-куба линии потока темно-синие, у которых средняя линейная скорость меньше 0.5 м/с.



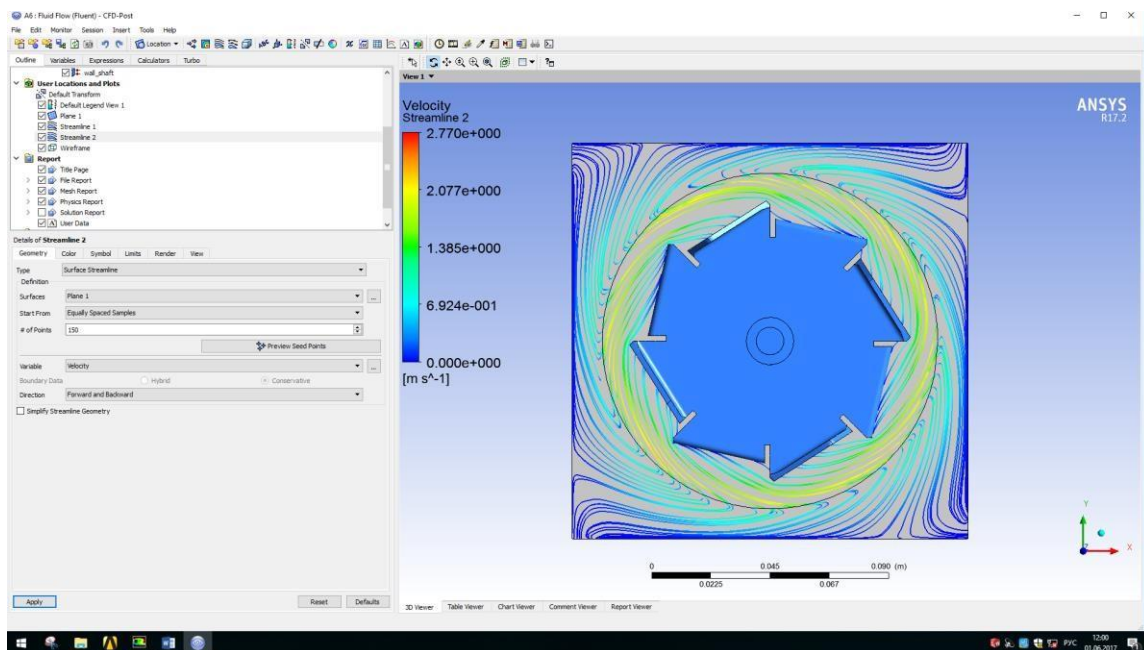


Рис. 37. Вид сверху фрезерного импеллера

На рисунке видно, что основные массивы линий потока жидкости желтые-зеленые-синие при перемешивании фрезерными импеллерами, что обозначают, что данный импеллер имеет высокую скорость движения потока: выше 1.5 м/с. Самая большая скорость (красная) в данном случае около 2.8 метра в секунду. Кроме того, плотность линий потока почти равномерна, она чуть-чуть уменьшается от центра до углов.

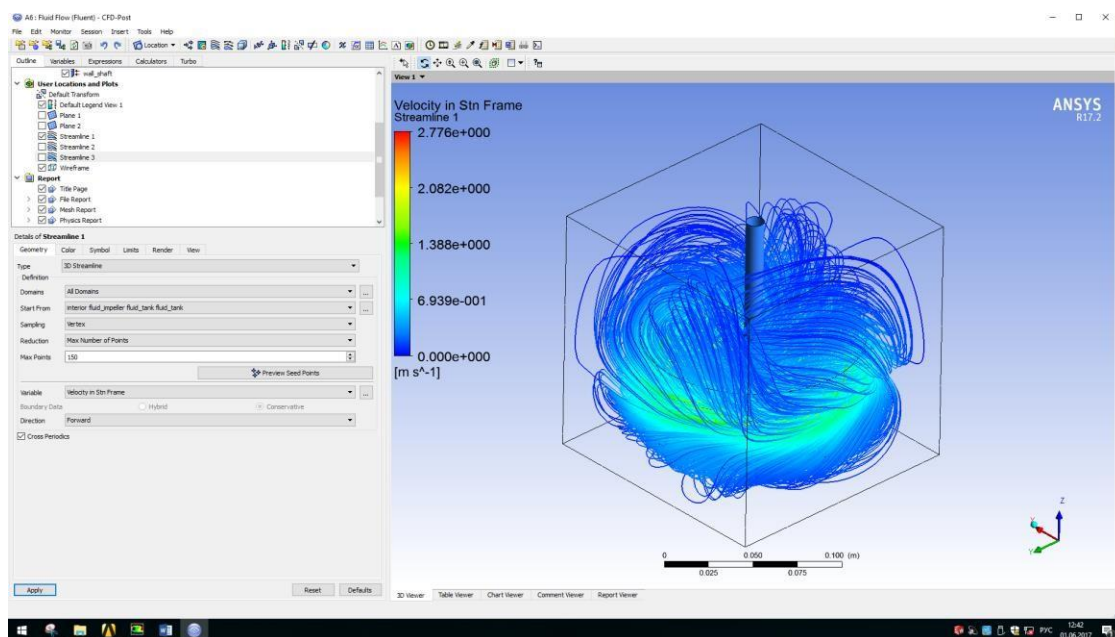


Рис. 38. Трехмерное изображение фрезерного импеллера

Как показано на Рис.32, проблема фрезерного импеллера при перемешивании не в скорости, а в ее распределении. Здесь видно, что хотя фрезерный импеллер имеет самую высокую скорость: 2.8м/с, но высоко-средняя скорость существует только в маленькой области, находящейся в центре евро-куба. Цвет большинства линий потока, находящихся в евро-кубе синий и темно-синий при перемешивании, что означает средняя скорость перемешиваемой жидкости меньше 0.5 м/с и в итоге приведет к неэффективности перемешивании. Кроме этого, в углах практически нет линий потока жидкости.

### 1.2.6 Проведение эксперимента по определению наиболее эффективного типа импеллера

В эксперименте, спроектированные и изготовленные импеллеры перемешивать гель в модели евро-куба, изготовленного из оргстекла. Размеры евро-куба: 146x146x148 мм. Для обеспечения герметичности при соединении оргстекла применялся специальный клей.

#### ✓ Подготовка эксперимента

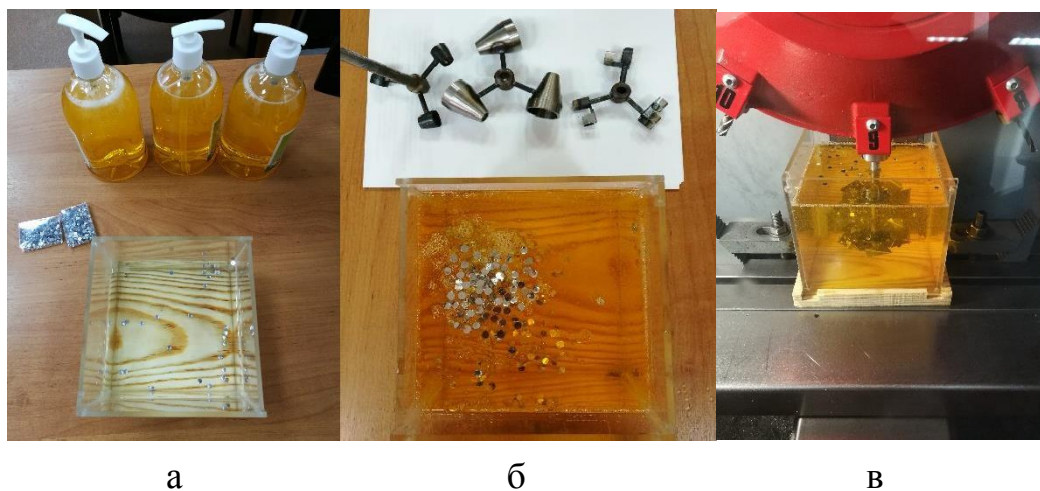


Рис.39. Подготовка к эксперименту: а – евро-куб, экспериментальный гель, фликеры для эксперимента; б – разные виды импеллеров; в – экспериментальная установка на фрезерном станке

Эксперимент проведён с использованием непосредственно самого геля и фликеров, добавленных для наблюдения траектории движения жидкости.

В евро-куб было залито 3,0 – 3,5 л геля, затем на поверхность жидкости были добавлены тонкие круглые фликеры (как показано на рисунке 36, б) и произведено перемешивание механическим способом с мешалками разного вида и при разных скоростях вращения вала мешалки до момента, когда фликеры не будут распределены по объему геля однородно, и визуально не будут наблюдаться зоны с неподвижными или медленно движущимися фликерами.

Для дальнейшего анализа эффективности перемешивания во время перемешивания записывалось видео, из которых делались экранные снимки для разных скоростей перемешивания. Также необходимо наблюдать траекторию движения фликеров, особенно на углах евро-куба, при перемешивании и сравнить с результатами моделирования в программе Ansys Fluent.

✓ Эксперимент для фрезерного импеллера

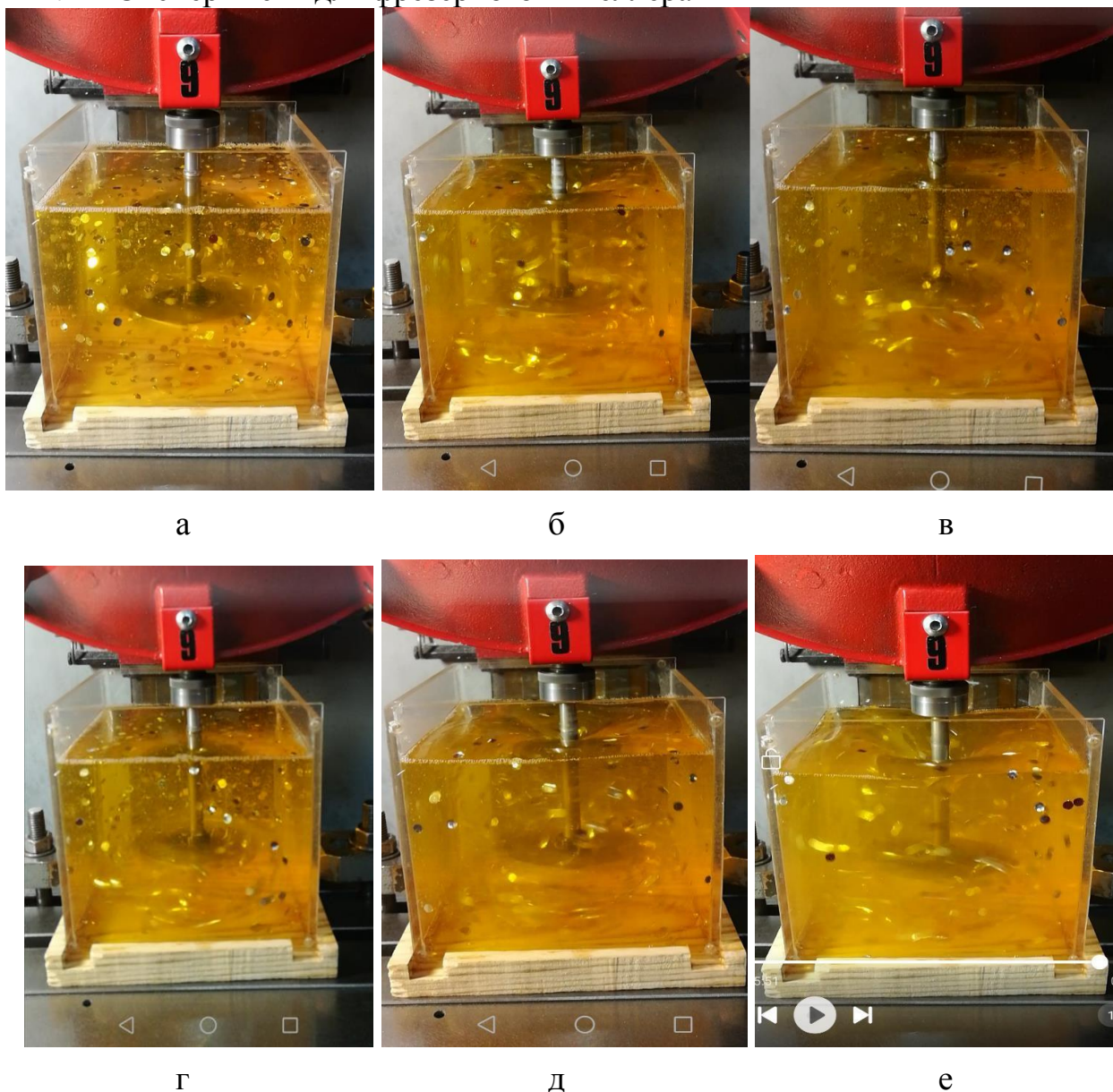


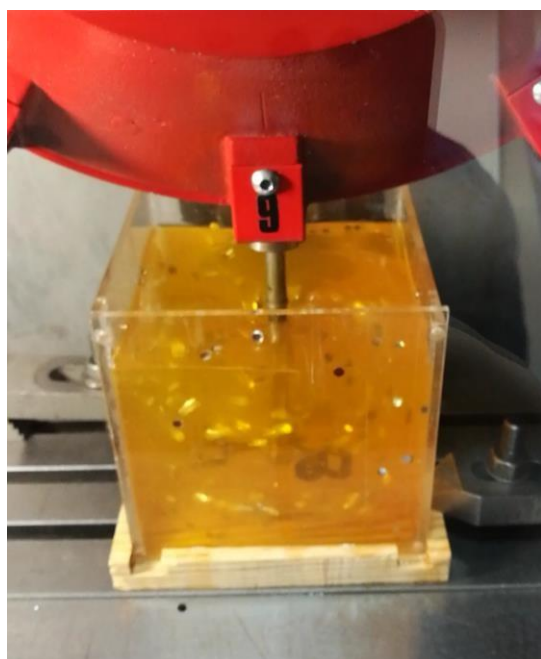
Рис. 40. Физический эксперимент фрезерного импеллера скорость вращения импеллера: а – 300 об/мин; б – 400 об/мин; в – 500 об/мин; г – 600 об/мин; д – 700 об/мин; е – 800 об/мин

Из вышепоказанных фото видно, что со скоростью от 300 об/мин до 600 об/мин фликеры медленно движутся в центре евро-куба. Однако со скоростью 700 об/мин фликеры уже распределены не только вокруг мешалки, но и в всех восьми углах куба. Но на верхней поверхности геля фликеры все-таки

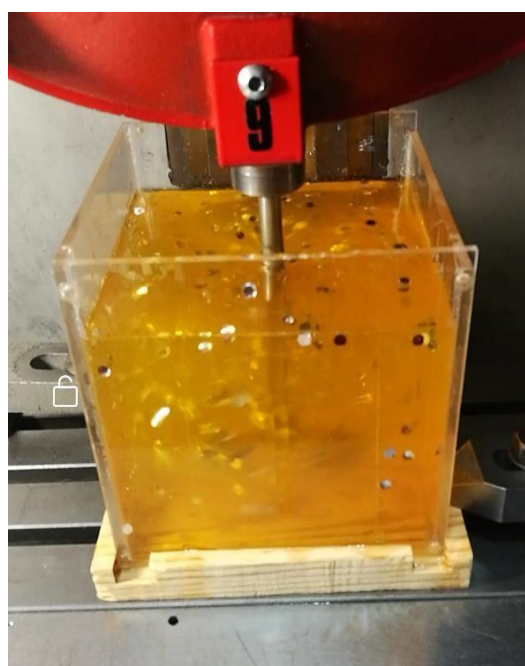


движутся быстро только вокруг вала. Интенсивно эффективно перемешивать фрезерными импеллерами со скорости 800 об/мин, когда фликеры быстро движутся во всем объеме евро-куба.

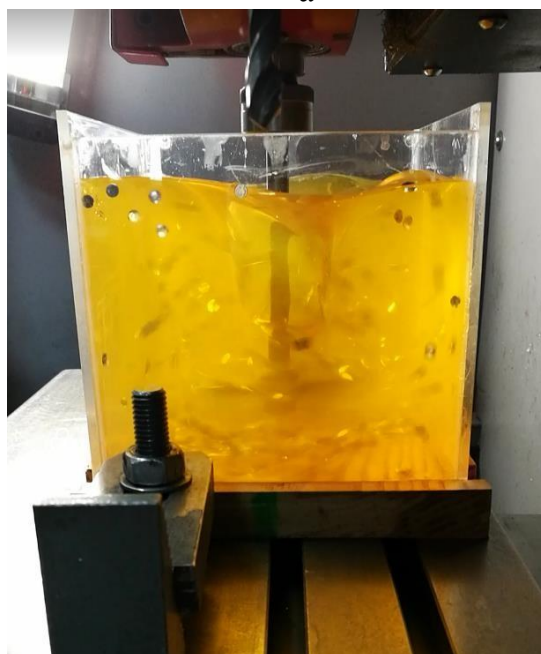
✓ Эксперимент для пропеллерного импеллера



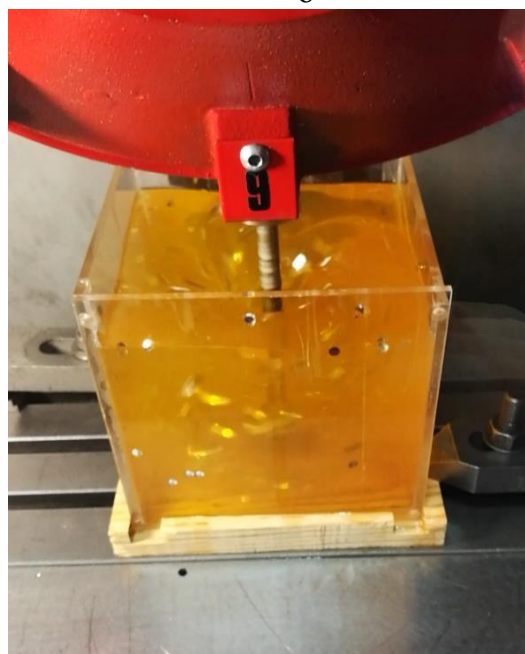
а



б



в



г

Рис.41. Физический эксперимент пропеллерного импеллера, скорость вращения импеллера:

а – 300 об/мин; б – 400 об/мин; в – 500 об/мин; г – 600 об/мин

Из вышепоказанных фото видно, что со скоростью от 300 об/мин до 400 об/мин фликеры медленно движутся в центре евро-куба. Однако со скоростью 500 об/мин фликеры уже распределены не только вокруг мешалки, но и в всех восьми углах и на верхней поверхности геля. Но со скорости 600 об/мин



перемешивание считают слишком интенсивно так как внутри геля уже начали образовываться пузырьки воздуха, что снижает качество геля и затрудняет визуальное оценивание эффективности перемешивания, поэтому желательная скорость перемешивании пропеллерного импеллера – 500 об/мин.

✓ Эксперимент для чашечного импеллера

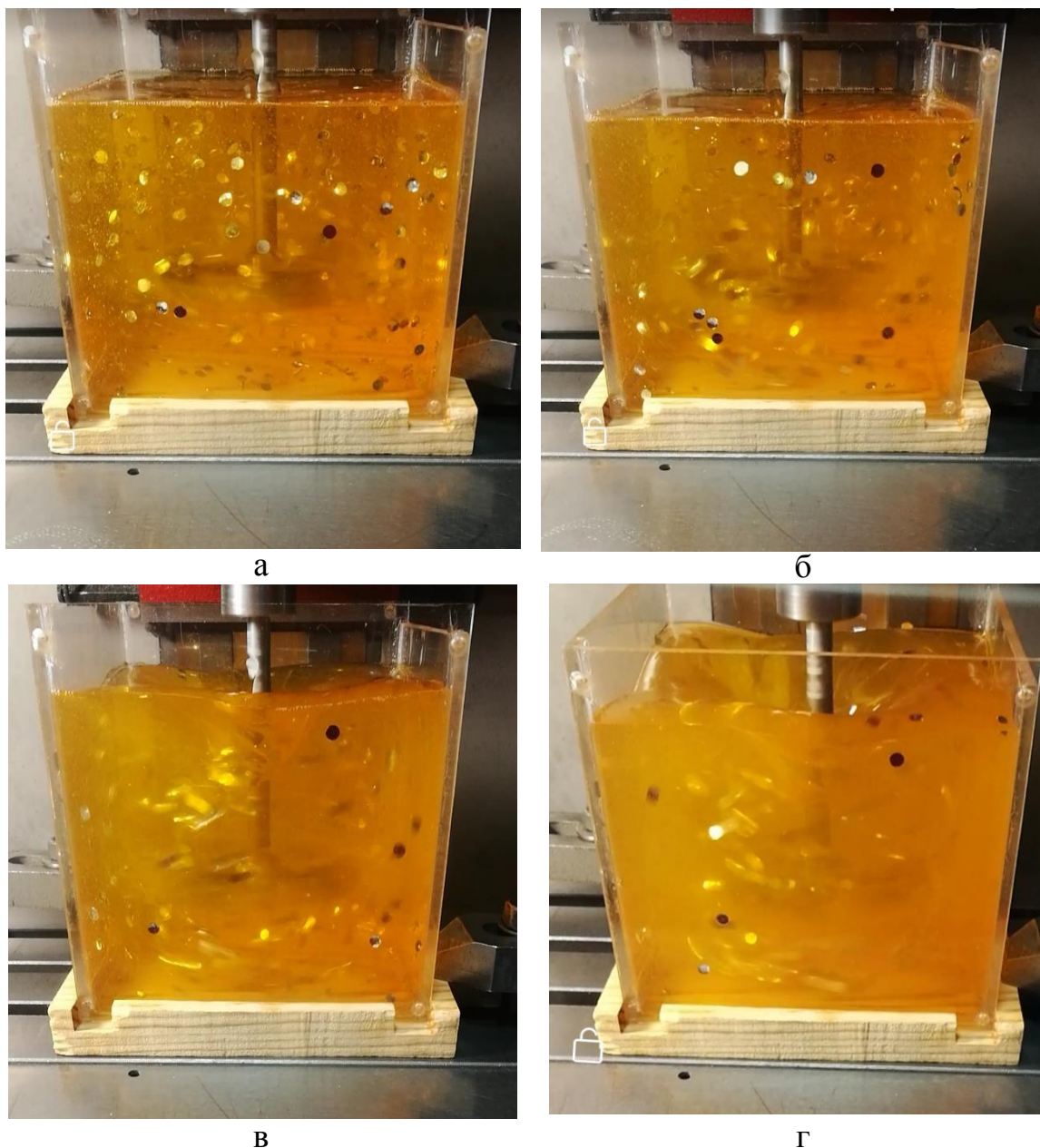


Рис.42. Физический эксперимент чашечного импеллера, скорость вращения импеллера: а – 300 об/мин; б – 400 об/мин; в – 500 об/мин; г – 600 об/мин

Эффективность чашечного импеллера схожа с эффективностью пропеллерного импеллера – при скорости 300 – 400 об/мин фликеры движутся только в середине евро-куба. А при скорости 500 об/мин фликеры распределены во всех восьми углах и на верхней поверхности геля. Но со скорости 600 об/мин перемешивание считают слишком интенсивно так как

внутри геля уже начали образовываться пузырьки воздуха, что снижает качество геля и затрудняет визуальное оценивание эффективности перемешивания, поэтому желательная скорость перемешивания чашечного импеллера – 500 об/мин. Также надо отметить, что при сравнении эффективности перемешивания при 600 об/мин пропеллерными импеллерами и чашечными импеллерами можно отметить что при одной и той же высокой скорости, чашечный импеллер более активно перемешивает жидкость.

Таким образом, из вышепоказанных анализа можно сделать вывод, что самым быстрым перемешиванием гелей и высоковязких сред является перемешивание с чашечными элементами, позволяющими создать турбулентный поток во всем объеме жидкости. А при одной и той же скорости эффективность фрезерного импеллера ниже чашечного и пропеллерного импеллера.

### 1.3 Результаты исследования

В результате проделанной работы:

Для того, чтобы оценить эффективность нужно рассмотреть распределение скорости и линия поток жидкости в евро-кубе. Хотя вышепоказанные виды импеллеров имеют одни и те же диаметры, но их конструкции разные и приведет к разным плоскостям в контакте между импеллерами и жидкой средой в горизонтальном и вертикальном направлении. По теорию, в процессе перемешивании, чем больше контактная площадь импеллеров, находящаяся перпендикулярно к жидкости, тем больше скорость перемешивании будет, которая поможет быстрее и в полнее мере перемешивать.

По анализу рисунков линия поток жидкости в евро-кубе и рисунков скорости, а также полученными данными в физическом эксперименте можно определить наилучший вид импеллеров для нашего перемешивании.

1. Сравнение скорости необходимой для эффективного перемешивания, показало, что наибольшая эффективная скорость перемешивания соответствует фрезерному импеллеру. Разница в эффективных скоростях перемешивания между чашечными и проволочными импеллерами практически не большая.

2. Кроме сравнения максимальной скорости, важно также рассмотреть распределение скорости в евро-кубе. Из Рис. 28, 31, 33 можно отметить что распределение скорости по глубине жидкости. Так как синий свет показывает маленькую скорость перемешивания, для оценки эффективности можно сравнить лишь диапазоны скорости с красного до голубого света. С помощью шкалы масштабы видно что диапазон средневысокой скорости фрезерного импеллера самый узкий: около 30 мм по глубине перемешивания, а диапазоны чашечного и проволочного импеллера побольше, а именно: 60 мм для проволочного и 80 мм для чашечного. Отсюда можно сделать вывод что с точки зрения скорости, чашечными импеллерами являются самый эффективный вариант.

3. При сравнении линия поток жидкости в евро-кубе на Рис. 27,30,34, видно, что в углу плохо перемешивает фрезерный импеллер: его плотность линий поток самый маленький. Самый эффективно перемешивает чашечный импеллер: циркуляция жидкости распределена в всех 4 углах. На Рис. 29, 32, 35, 36 можно наблюдать 3D-линии во всем объеме. Самый большой эффективный объем перемешивания имеет чашечный импеллер.

Из вышесказанных причин, самый эффективно перемешивает чашечный импеллер. Наилучший вид для перемешивания вязких сред определен.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате выполнения работы получены следующие научные и практические результаты:

1. В результате анализа конструктивных особенностей миксеров и обзора известных программных продуктов для моделирования физических процессов, определен подход к решению задачи механического перемешивания в миксерах с использованием пакетов программ Ansys Fluent v17.2 и Ansys CFX v17.2
2. Разработаны программы, адаптирующие комплексы программ Ansys Fluent v17.2 и Ansys CFX v17.2 к расчету механического перемешивания.
3. Достоверность разработанных физических моделей подтверждена удовлетворительным совпадением экспериментальных и расчетных данных.
4. Выявлены распределения скоростей в перемешивании в геле разными импеллерами с вязкостью 4000 спз;
5. Предложены результат (время), позволяющий оценить скорость механического перемешивания.
6. Разработаны рекомендации по выбору параметров и режимов работы в миксере, позволяющие повысить его производительность и качество.

## 2. Раздел «Социальная ответственность»

### 2.1 Производственная безопасность

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием некоторых опасных и вредных факторов (ГОСТ 12.0.002-80 «ССБТ. Основные понятия. Термины и определения»), которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические и психофизиологические (ГОСТ 12.0.003-74 «ССБТ. Опасные и вредные факторы. Классификация»).

Производственным риском будем считать опасные и вредные производственные факторы воздействующие на человека. При рассмотрении опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) будем руководствоваться ГОСТ 12.0.003-91.

ОВПФ делятся на четыре группы: физические, химические, биологические и психофизические. В штамповочных цехах встречаются все четыре группы ОВПФ. На проектируемом участке особенно обширна группа физических факторов. Неблагоприятные факторы могут возникать:

- от движущего межцехового или внутрицехового транспорта;
- повышенная запыленность рабочей зоны;
- повышенный уровень шума и вибрации на рабочем месте;
- от воздействия на человека исходного материала заготовок и готовых деталей (наличие острых кромок, выступов и заусенцев);
- от технического состояния оборудования (движение незащищенных органов, неисправности, отклонение от транспортных режимов работы);
- от помещения участка (неблагоприятный пол, проливы масел, узкие проходы, неубранные отходы);
- от самих рабочих (низкая квалификация, монотонность, физические перегрузки)

После проведения тщательного анализа ОВПФ, на спроектированном участке, был проведен комплекс мер, обеспечивающих максимальную безопасность труда, результаты сведены в таблицу 1.1

Таблица 1.1 – Опасные и вредные факторы

Наименование рабочих мест	Наименование ОВПФ	Источники возникновения ОВПФ	Имеющиеся средства защиты	Требования безопасности и
Разматывающее устройство	Наличие вращающихся частей (рулон ленты, рабочие части разматывающего устройства)	Работа правильного устройства	Ограждения	ГОСТ 12.2.003 – 91

Разматывающее устройство	Самопроизвольное осевое перемещение рулона с возможным слетанием с башмаков разматывающего устройства	Неисправность ограничителей, фиксирующего устройства	Ограждение, контроль исправности ограничителей и фиксирующего устройства	ГОСТ 12.2.003 – 91
--------------------------	---	--	--	--------------------

Продолжение таблицы 1.1 – Анализ опасных и вредных факторов при эксплуатации автомата

Наименование рабочих мест	Наименование ОВПФ	Источники возникновения ОВПФ	Имеющиеся средства защиты	Требования безопасности
Правильное устройство	Опасное для жизни напряжение в сети оборудования (переменный ток 380 В)	Повреждение проводки и изоляции	Ограждения, заземление	ГОСТ 12.1.018 – 86
Правильное устройство	Наличие движущихся частей (лента)	Работа правильного устройства	Ограждения	ГОСТ 12.2.003 – 91
Валковая подача	Наличие движущихся частей (лента)	Работа валковой подачи	Ограждения	ГОСТ 12.2.003 – 91
Валковая подача	Опасное для жизни напряжение в сети оборудования (переменный ток 380 В)	Повреждение проводки и изоляции	Ограждения, заземление	12.1.018 – 86
Компенсационная петля	Наличие движущихся частей (лента)	Работа валковой подачи и правильного устройства	Ограждения	ГОСТ 12.2.003 – 91

Продолжение таблицы 1.1 – Анализ опасных и вредных факторов при эксплуатации автомата

Наименование рабочих мест	Наименование ОВПФ	Источники возникновения ОВПФ	Имеющиеся средства защиты	Требования безопасности
Перемешивание	Шум, вибрации	Работа муфты, тормоза	Контроль и наладка механизмов	ГОСТ 12.1.012 – 90
Наименование рабочих мест	Наименование ОВПФ	Источники возникновения ОВПФ	Имеющиеся средства защиты	Требования безопасности
Перемешивание	Опасное для жизни напряжение в сети оборудования (переменный ток 380 В)	Повреждение проводки и изоляции	Заземление, предохранители	12.1.018 – 86
Весь комплекс	Утечки масла, воздуха, раствора воды под давлением	Неисправность вентилях, разрыв трубопровода, выход из строя уплотняющих устройств, скачки давлений	Реле давления, предохранительные клапаны, контроль оператора комплекса	ГОСТ 12.2.118 – 85
Весь комплекс		Низкая квалификация рабочих, Монотонность, физические перегрузки	Общие требования безопасности оборудования	ГОСТ 12.2.003 – 91 ГОСТ 12.2.017 – 86 ГОСТ 12.3.004 – 75

### **Микроклимат**

Состояние микроклимата на перемешивании должна соответствовать допустимым нормам по ГОСТ 12.1.005-88.

Метеорологические условия в производственных условиях определяются следующими параметрами:

- температура воздуха  $t$ , °С;
- относительная влажность воздуха  $\phi$ , %;
- скорость движения воздуха на рабочем месте  $v$ , м/с.

Движение воздуха в помещениях является важным фактором, влияющим на тепловое самочувствие человека. В жарком помещении движение воздуха способствует увеличению отдачи теплоты организмом и

улучшает его состояние, но оказывает неблагоприятное воздействие при низкой температуре воздуха в холодный период года.

По тяжести работ оператор относится к категории 2а. Параметры микроклимата не должны выходить за рамки допустимых значений (Таблица 1.2)

Таблица 4.2 - Результаты замеров микроклимата

Период года	Категория работ	Температура, С°		Влажность, %		Скорость воздуха, м/с	
		Фактическая	Допустимая	Фактическая	Допустимая	Фактическая	Допустимая
Теплый	2а	22	18-27	62	65	0,15	0,2
Холодный	2а	19	17-23	55	<75	0,1	0,2

На проектируемом участке показания замеров микроклимата не превышает допустимых пределов и обеспечивается за счет следующего:  
в холодный период года – применение водяного отопления;  
в теплый период года – искусственной вентиляцией.

### **Освещенность**

Согласно СНиП 23-05-95 в лаборатории, где происходит периодическое наблюдение за ходом производственного процесса при постоянном нахождении людей в помещении освещенность при системе общего освещения не должна быть ниже 150 Лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает высокий уровень работоспособности, оказывает положительное психологическое действие на человека и способствует повышению производительности труда.

На рабочей поверхности должны отсутствовать резкие тени, которые создают неравномерное распределение поверхностей с различной яркостью в поле зрения, искажает размеры и формы объектов различия, в результате повышается утомляемость и снижается производительность труда.

Для защиты от слепящей яркости видимого излучения (факел плазмы в камере с катализатором) применяют защитные очки, щитки, шлемы. Очки на должны ограничивать поле зрения, должны быть легкими, не раздражать кожу, хорошо прилегать к лицу и не покрываться влагой.

Расчёт общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности выполняется методом коэффициента светового потока, учитывающим световой поток, отражённый от потолка и стен. Длина помещения  $A = 7$  м, ширина  $B = 6$  м, высота = 3,5 м. Высота рабочей поверхности над полом  $h_p = 1,0$  м. Согласно СНиП 23-05-95 необходимо создать освещенность не ниже 150 лк, в соответствии с разрядом зрительной работы.

Площадь помещения:



$$S = A \times B,$$

где  $A$  – длина, м;

$B$  – ширина, м.

$$S = 7 \times 6 = 42 \text{ м}^2$$

Коэффициент отражения свежепобеленных стен с окнами, без штор  $\rho_c=50\%$ , свежепобеленного потолка  $\rho_{п}=70\%$ . Коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника, для помещений с малым выделением пыли равен  $K_3=1,5$ . Коэффициент неравномерности для люминесцентных ламп  $Z= 1,1$ .

Выбираем лампу дневного света ЛД-40, световой поток которой равен  $\Phi_{ЛД} = 2300$  Лм.

Выбираем светильники с люминесцентными лампами типа ОДОР-2-40. Этот светильник имеет две лампы мощностью 40 Вт каждая, длина светильника равна 1227 мм, ширина – 265 мм.

Интегральным критерием оптимальности расположения светильников является величина  $\lambda$ , которая для люминесцентных светильников с защитной решёткой лежит в диапазоне 1,1–1,3. Принимаем  $\lambda=1,1$ , расстояние светильников от перекрытия (свес)  $h_c = 0,3$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = h_n - h_p,$$

где  $h_n$  – высота светильника над полом, высота подвеса,

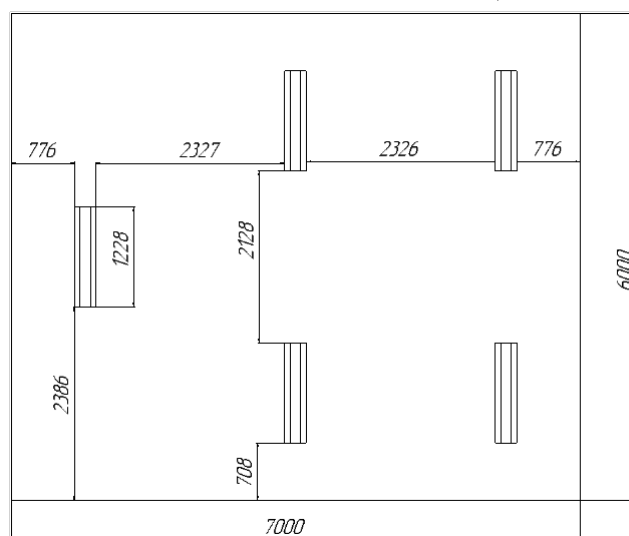
$h_p$  – высота рабочей поверхности над полом.

Наименьшая допустимая высота подвеса над полом для двухламповых светильников ОДОР:  $h_n = 3,5$  м.

Высота светильника над рабочей поверхностью определяется по формуле:

$$h = H - h_p - h_c = 3,5 - 1 - 0,5 = 2,0 \text{ м.}$$

Размещаем светильники в два ряда. На рисунке изображен план помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.



План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами.

Индекс помещения определяется по формуле:

$$i = \frac{7 \cdot 6}{h \cdot (7 + 6)} = \frac{7 \cdot 6}{2,0 \cdot (7 + 6)} = 1,6$$

Коэффициент использования светового потока, показывающий какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность, для светильников типа ОДОР с люминесцентными лампами при  $\rho_{\text{П}} = 70\%$ ,  $\rho_{\text{С}} = 50\%$  и индексе помещения  $i = 1,6$  равен  $\eta = 0,47$ .

Потребные группы люминесцентных ламп светильника по формуле:

$$N = \frac{E \cdot K_3 \cdot Z}{\Phi_{\text{П}} \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{2300 \cdot 0,47} = 9,6 = 10$$

Общее число светильников:  $N = 5$ .

Расстояние между соседними светильниками или рядами определяется по формуле:

$$2 \cdot \frac{2}{3} + 3 \cdot 265 = 7000$$

$$\frac{2}{3} = 2327 \text{ мм}$$

Расстояние от крайних светильников или рядов до стены определяется по формуле:

$$\frac{2}{3} + 2 \cdot 1227 = 6000$$

$$\frac{2}{3} = 2128 \text{ мм}$$

Расчет световой поток группы люминесцентных ламп светильника по формуле:

$$\Phi_{\text{рас}} = \frac{E \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{150 \cdot 7 \cdot 6 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{10 \cdot 0,47} = 2212 \text{ лм}$$

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% \leq 20\%;$$

$$\frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% = \frac{2300 - 2212}{2300} \cdot 100\% = 3,8\%.$$

Таким образом:  $-10\% \leq 3,8\% \leq 20\%$ , необходимый световой поток светильника не выходит за пределы требуемого диапазона.

### Электробезопасность

Опасное и вредное воздействия на людей электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей проявляются в виде электротравм и профессиональных заболеваний. Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока, электрической дуги и электромагнитных полей зависит от:

- рода и величины напряжения и тока;
- частоты электрического тока;
- пути тока через тело человека;

- продолжительности воздействия электрического тока или электромагнитного поля на организм человека;
- условий внешней среды [13].

Электротравма опасна прежде всего воздействием тока на сердечно-сосудистую систему. Напряжение от 36 вольт и выше вполне способно вызвать остановку сердца или дыхания, однако убивает не напряжение, а сила тока.

Рабочий цех относится ко второму классу по опасности поражения электрическим током - помещения с повышенной опасностью.

Есть условие (возможность), когда человек может одновременно прикоснуться к металлическим корпусам электрооборудования и к заземленным металлоконструкциям зданий (из примеров можно привести случай, когда человек может взяться одной рукой за батарею отопления - второй за корпус станка).

### СКЗ

- оградительные устройства;
- разделительный трансформатор;
- устройства автоматического контроля и сигнализации;
- изолирующие устройства и покрытия;
- устройства защитного заземления и зануления;
- устройства автоматического отключения;
- устройства выравнивания потенциалов и понижения напряжения;
- устройства дистанционного управления; ~ предохранительные устройства;
- молниеотводы и разрядники;
- знаки безопасности.

### СИЗ

- перчатки, галоши, боты диэлектрические
- деревянные лестницы
- коврики диэлектрические
- инструменты с деревянными рукоятками

### Вредные выделения

При анализе вредных выделений на участке выявлены вредные вещества: масло минеральное, окись железа, результаты замеров сведены в таблицу 1.4

Таблица 1.4 - Результаты замеров вредных выделений

Наименование вещества	max, мг / м <sup>3</sup>	Номин. мг / м <sup>3</sup>	ПДК мг / м <sup>3</sup>	Класс опасности	Агрегатное состояние
Окись железа	3,6	3,2	6	4	Аэрозоль
Масла минеральные	2,1	1,9	5	3	Аэрозоль

На проектируемом участке концентрация загрязняющих элементов соответствует санитарным нормам ПДК по ГОСТ 12.1.005 – 88. Очистку и вывод загрязнения в атмосферу осуществляется приточной – вытяжной вентиляцией.

### Шум

Штамповочные цехи характеризуются повышенным шумом. Шум на производстве наносит большой ущерб, вредно действуя на организм человека и снижая производительность труда. Утомление рабочих и операторов из-за сильного шума увеличивает число ошибок при работе, способствует возникновению травм. Главными источниками шума на участке являются технологическое оборудование, средства механизации и автоматизации. Причинами шумообразования при их работе являются технологические операции или удары штампа о заготовку и прорывы сжатого воздуха, используемого для обдувки матриц штампов. Состояние шума на рабочих местах в соответствии с ГОСТ 12.1.003 – 83\* приведено в таблице 1.5.

Таблица 1.5 - Нормы шума по ГОСТ 12.1.003 – 83\*

Рабочие места	Уровни звукового давления ДБ в октавных полосах со средне геометрическими частотами, Гц							Уровни звука и эквивалентные уровни звука, ДБа
	63	125	250	500	1000	2000	4000	
Место управления	79	70	68	58	55	52	50	60
Места контроля работы комплекса и контроля качества готовых деталей	94	87	82	78	75	73	71	80

Фактическое (в результате замеров) состояние шума приведено в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - шумовая характеристика прессы при выполнении технологической операции

Рабочие места	Уровни звукового давления ДБ в октавных полосах со средне геометрическими частотами, Гц							Уровни звука и эквивалентные уровни звука, ДБа
	63	125	250	500	1000	2000	4000	
Место управления	92	86	81	75	70	69	65	82

Места контроля работы комплекса и контроля качества готовых деталей	109	106	103	99	96	95	93	105
---	-----	-----	-----	----	----	----	----	-----

Нормальный шум на участке обеспечивается за счет следующих мер:

- звукоизоляция
- звукопоглощение

Следует применять звукопоглощающие кожухи и глушители. Для защиты от шума рабочих и персонала в местах близких к технологическому оборудованию применять наушники, вкладыши и шлемы, в местах близких к технологическому оборудованию.

### Вибрация

Воздействие вибраций не только ухудшает самочувствие работающего и снижает производительность труда, но часто приводит к тяжелому профессиональному заболеванию – виброболезни.

Источниками вибрации являются технологические операции: вырубки, отрезки, пробивки и перемешивание, когда происходит резкое нагружение и почти мгновенная разгрузка системы «перемешивание». Технологическая вибрация действует на весь организм оператора, когда он находится около рабочего места.

Каждое рабочее место имеет свои данные по вибрации – общей и локальной, в соответствующем частотном диапазоне.

На спроектированном участке вибрация не превышает санитарных норм.

Нормативные требования и рекомендации по вибрации содержат ГОСТ 12.1.012. – 90 (СТС ЭВ 1930 – 79), ГОСТ 12.4.002 – 74, ГОСТ 12.4.024 – 76. Непосредственно для комплекса данные приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 - Нормы вибрации по ГОСТ 12.1.012 – 90

Среднегеометрические полосы октавных полос, ГЦ	Допустимые размеры нормируемого параметра											
	Виброускорение, м/с <sup>2</sup>				Виброскорость, м/с				Уровень виброскорости, ЛВ			
	в 1/3 октавы		в 1/1 октавы		в 1/3 октавы		в 1/1 октавы		в 1/3 октавы		в 1/1 октавы	
	z	xy	z	xy	z	xy	z	xy	z	xy	z	xy



безопасности, а также неправильного использования дополнительных бытовых электроприборов и электроустановок;

- возгорание устройств искусственного освещения [1].

Пожарная профилактика основывается на исключении условий, необходимых для горения, и использования принципов обеспечения безопасности. При обеспечении пожарной безопасности решаются следующие задачи:

- предотвращение пожаров;
- возгорание;
- локализация возникших пожаров;
- защита людей и материальных ценностей;
- тушение пожара.

Пожаром называют неконтролируемое горение во времени и пространстве, наносящее материальный ущерб и создающее угрозу жизни и здоровью людей.

Предотвращение пожара достигается исключением образования горючей среды и источников зажигания, а также поддержанием параметров среды в пределах, исключающих горение.

Для профилактики возникновения пожаров необходимо проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия:

Организационные мероприятия:

- противопожарный инструктаж обслуживающего персонала;
- обучение персонала правилам техники безопасности;
- издание инструкций, плакатов, планов эвакуации.

Эксплуатационные мероприятия:

- соблюдение эксплуатационных норм оборудования;
- обеспечение свободного подхода к оборудованию. В рассматриваемом тех. бюро места размещены так, что расстояние между рабочими местами с видеотерминалами составляет более 4,07 м, расстояния между боковыми поверхностями порядка 1 м, что соответствует нормам, а поэтому дополнительных мер защиты не требуется;

- содержание в исправности изоляции токоведущих проводников.

Технические мероприятия:

- соблюдение противопожарных мероприятий при устройстве

электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения. В кабинете имеется порошковый огнетушитель типа ОП–5 и находится пожарный щит, установлен рубильник, обесточивающий всю аудиторию, на двери аудитории приведен план эвакуации в случае пожара;

- профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования [4].

Так же необходимо предусмотреть наличие эвакуационных выходов для персонала. Число эвакуационных выходов из здания с каждого этажа должно быть не менее двух. Ширину эвакуационного выхода (двери) устанавливают в зависимости от общего количества людей, эвакуирующихся через этот выход, но не менее 0.8 м. Высота прохода на эвакуационных путях должна быть не менее 2 м. План эвакуации приведен на рисунке 2.

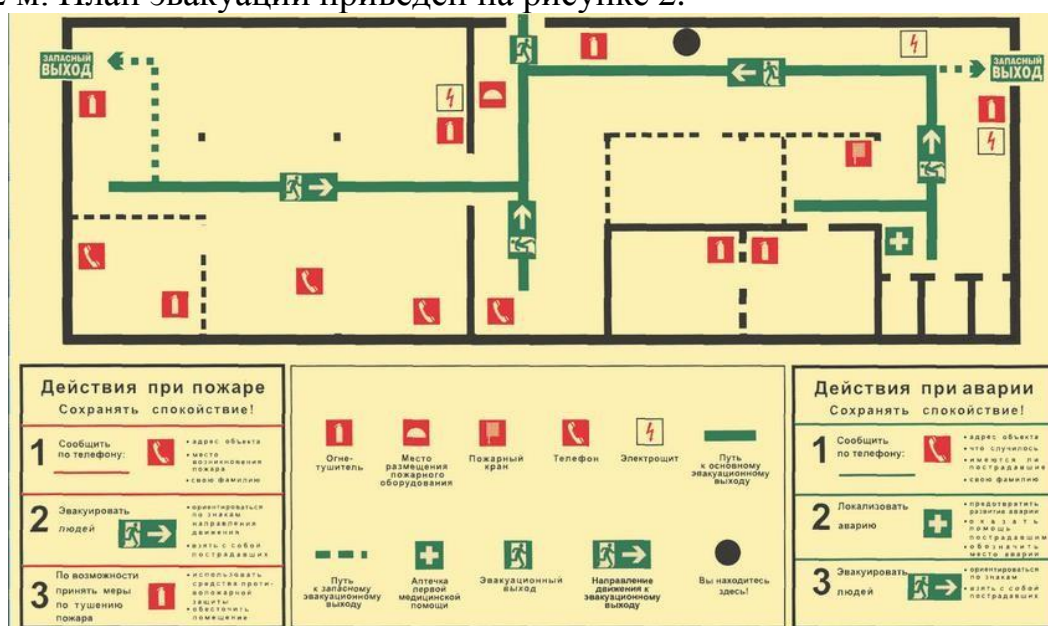


Рис. 2 – План эвакуации из технологического бюро.



### 3. Экономический раздел

#### Описание работы.

В последнее время в косметическом производстве механическое перемешивание все большее распространение получают способ, предназначенный для получения высококачественных геля или шампуня. Особенно вырос спрос на подобные установки в производстве повседневных потребительных товаров. Требования к установкам перемешивания и изделиям из мешалки постоянно растут в связи с ростом их использования практически во всех областях промышленности. Стратегии крупных компаний, производящие миксеры таких как ООО «ФастТайм», г. Нижний Новгород, ООО «Астерион», г. Санкт-Петербург.

Особое место в установках для перемешивания занимают гидродинамические технологии, совмещающие простоту, надежность и высокую эффективность. Проектирование разных видов импеллеров для интенсивного перемешивания является практически обязательным условием при создании современного соответствующего оборудования. Для этого, при создании нового и реконструкции уже имеющегося оборудования необходимо применять точные методы расчета физических процессов (проектирование вида и размера импеллеров и проведение их физического эксперимента а также симуляция в CFD системе), протекающих в проектируемых установках.

Несмотря на довольно широкое промышленное внедрение технологии перемешивания, вопросы создания новых и совершенствования известных устройств остаются актуальными в связи с сложностью анализа физических процессов перемешивания в миксерах. Поэтому, большое значение приобретает поиск известных и разработка новых методик анализа и расчета, сложных физических явлений с учетом всего многообразия факторов, определяющих технологический процесс в миксере с перемешиванием.

Существенным недостатком подходов у всех вышеназванных исследователей является большое количество упрощений расчетных моделей и невозможность точной количественной оценки параметров технологического процесса.

В настоящее время исследователи имеют возможность использовать все преимущества вычислительных систем и специального программного обеспечения, что обуславливает резкое увеличение решения сложных и разнообразных задач.

Цель диссертационной работы - исследование гидродинамических процессов при перемешивании в среде геля и шампуня с вязкостью 4000 спз для повышения производительности в миксерах и проектирование оборудования для перемешивания.

Задача была выполнена с помощью экспериментальных данных и компьютерного расчета. Процесс перемешивания разработала в среде геля и шампуне с вязкостью 4000 спз при использовании разных спроектированных видов импеллеров с применением пакетов программ Ansys Fluent и Ansys CFD. (CAE). Таким образом, после анализа полученных результатов, по определению эффективности перемешивания импеллерами различной конструкции, самый эффективный модель был определен и оборудование было проектировано.

### 3.1. Карта сегментирования рынка услуг по разработке интернет-ресурсов

Сегментировать рынок услуг можно по следующим критериям: размер компании-заказчика, вид интернет-ресурса (рис. 1).











		Вид интернет-ресурса			
		Корпоративный сайт	Интернет-каталог	Интернет-магазин	Информационный портал
Размер компании	Крупные				
	Средние				
	Мелкие				

Рис.1 Карта сегментирования рынка услуг по разработке интернет-ресурсов:

-  -Компания ПромЭкоВектор;
-  -Компания ФастТайм;
-  -Компания Астерион

Результатом сегментирования: Основные сегменты являются интернет-каталог и Корпоративный сайт. Для крупного и среднего производства, важно существует интернет-магазин. Для мелкого производства можно отсутствует интернет-магазин.

### 3.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 5.1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Конкурент 1 – ООО «ФастТайм»,

Конкурент 2 – ООО «Астерион».

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл i-го показателя

Таблица 5.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Технические критерии оценки ресурсоэффективности</b>							
1.Повышение производительности труда пользователя	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3

2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,04	5	4	4	0,2	0,16	0,16
3. Помехоустойчивость	0,05	3	3	3	0,15	0,15	0,15
4. Энергоэкономичность	0,07	4	5	4	0,28	0,35	0,28
5. Надежность	0,06	5	3	4	0,3	0,18	0,24
6. Уровень шума	0,04	4	5	4	0,16	0,2	0,16
7. Безопасность	0,04	5	5	5	0,2	0,2	0,2
8. Потребность в ресурсах памяти	0,05	1	1	1	0,05	0,05	0,05
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
10. Простота эксплуатации	0,04	3	3	3	0,12	0,12	0,12
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,02	3	3	3	0,06	0,06	0,06
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,02	1	1	1	0,02	0,02	0,02
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>							
1. Конкурентоспособность продукта	0,09	5	4	3	0,45	0,36	0,27
2. Уровень проникновения на рынок	0,06	4	4	4	0,24	0,24	0,24
3. Цена	0,09	5	4	3	0,45	0,36	0,27
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,05	5	5	5	0,25	0,25	0,25
5. Послепродажное обслуживание	0,07	5	2	4	0,35	0,14	0,28
6. Финансирование научной разработки	0,02	5	2	1	0,1	0,04	0,02
7. Срок выхода на рынок	0,04	3	5	5	0,12	0,2	0,2
8. Наличие сертификации разработки	0,04	3	4	4	0,12	0,16	0,16
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>79</b>	<b>72</b>	<b>70</b>	<b>4,17</b>	<b>3,74</b>	<b>3,63</b>

Из таблицы 5.1 видно, что ООО «ФастТайм» в целом более способный чем ООО «Астерион». По сравнению с ООО «Астерион», его основные преимущества в финансировании научной разработки и энергоэкономичность а его недостатки в послепродажное обслуживание и надежность. В общем, преимущества разработки делает её конкурентоспособной. Также разработанная пресс-форма имеет продолжительный срок эксплуатации и является надежной в работе.

### 3.3. SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Таблица 5.2 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны конструкторско-технологической разработки:</b>	<b>Слабые стороны конструкторско-технологической разработки:</b>
	<p>C1. Наличие современного оборудования</p> <p>C2. Наличие эффективных каналов распределения ГП</p> <p>C3. Продукция высокого качества</p> <p>C4. Высокая квалификация сотрудников</p> <p>C5. Наличие современной программы для проверки проектирования</p>	<p>Сл1. Низкое качество системы управления персоналом</p> <p>Сл2. Отсутствие эффективной системы мотивации и стимулирования</p> <p>Сл3. Низкий уровень маркетинговых исследований</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1. Высокая потребность промышленной сферы в разработке перемешивания для вязких сред</p> <p>В2. Расширение перспектив развития бизнеса</p> <p>В3. Появление новых технологий</p>	<p>1) Использование новых технологий</p> <p>2) Поддержание каналов распределения</p> <p>3) Нарботка и укрепление конструкторской документации</p>	<p>1) Создание эффективной системы мотивации и стимулирования</p> <p>2) Разработка системы карьерного роста</p> <p>3) Внедрение новых технологий</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>У1. Жесткая конкуренция</p> <p>У2. Нестабильные поставки материалов</p>	<p>1) Поиск новых, более выгодных поставщиков</p> <p>2) Вложение денежных средств в материалы</p> <p>3) Производство продукта с конкурентным преимуществом</p> <p>4) Усиление продвижения</p>	<p>1) Использование маркетинговых стратегий</p> <p>2) Поддержание каналов распределения</p> <p>3) Дополнительная мотивация сотрудников маркетинга</p> <p>4) Вложение денежных средств в материалы</p>

### 3.4. План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный и сетевой графики проекта.

Линейный график представляется в виде таблицы (табл. 2).

Таблица 2. Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1	Составления технологического задания	2	8.02.2016	10.02.2016	Ким А.Б
2	Выбор направления исследования	2	10.02.2016	12.02.2016	Ким А.Б
3	Изучение литературы	42	13.02.2016	01.04.2016	Ху Вэньсяо
4	Выбор конструкции импеллеров	26	2.04.2016	5.05.2016	Ху Вэньсяо
5	Разработка чертежей и 3D модель в Solidworks v 16.0	48	6.05.2016	1.07.2016	Ху Вэньсяо
6	Выполнение силового расчета в программе Visimix	136	29.08.2016	28.12.2016	Ху Вэньсяо.
7	Подготовка к эксперименту	14	6.02.2017	26.02.2016	Ху Вэньсяо
8	Проведение эксперимента	24	27.02.2017	30.03.2017	Ху Вэньсяо
9	Выполнение симуляции	33	1.04.2017	5.05.2017	Ху Вэньсяо
10	Консультирование	60	8.02.2016	1.06.2017	Ху Вэньсяо
11	Оформление магистерской диссертации	30	1.05.2017	1.06.2017	Ху Вэньсяо
12	Итоговая проверка работы	3	2.06.2017	5.06.2017	Ким А.Б
Итого		420	8.02.2016	5.06.2017	

В линейном графике не учитываются периоды зимних и весенних каникул. Следует также учесть, что данный график составляется индивидуально, некоторые периоды времени работ могут не совпадать с календарным планом учебного заведения.

Диаграмма Ганта – это тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. График строится в виде табл. 3 с разбивкой по месяцам за период времени выполнения научного проекта.





### 3.5 Реестр рисков исследования

Возможные риски проекта включают в себя непредвиденные обстоятельства, которые могут возникнуть в данном проекте и вызвать череду последствий, которые приведут к негативным эффектам. Для анализа рисков необходимо привести объективную оценку имеющейся информации по данным рискам.

Данные по рискам приведем в таблице 3.

Таблица 3.

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения	Условия наступления
1	Нелинейность поправочных коэффициентов	Ошибка в вычислениях	5	5	Высокий	Корректировка коэффициентов	Ошибка при проектировании метода
2	Ошибка характеристик жидкости	Ошибка в вычислениях	1	5	Низкий	Экспериментальное определение требуемых характеристик	Ошибка или неточность данных по материалам
3	Ошибка оборудования	Ошибка в вычислениях	1	4	Низкий	Калибровка оборудования	Штамм оборудования
4	Неверный выбор основополагающей методики	Ошибка в вычислениях	3	3	Средний	Выбор аналогичной методики	Ошибка при проектировании
5	Ошибка в расчетной программе	Ошибка в вычислениях	4	5	Высокий	Повторное программирование	Ошибка программиста

*Примечание:* Уровень риска может быть: высокий, средний или низкий в зависимости от вероятности наступления и степени влияния риска. Риски с наибольшей вероятностью наступления и высокой степенью влияния будут иметь высокий уровень, риски же с наименьшей вероятностью наступления и низкой степенью влияния соответственно низкий уровень.

Исходя из таблицы 3. наиболее характерными рисками являются ошибки при обработке с данными. Все перечисленные риски воздействуют на ошибки в вычислениях, другими словами при получении конечных данных. Основным условием возникновения данных рисков является человеческий фактор, так как проектирование методики производится исключительно вручную. Единственным надежным и эффективным направлением смягчения данных рисков является периодическая перепроверка расчетов, сохранение старых вычислений и их сравнение с актуальными. Иначе исключить человеческий фактор невозможно.

### 3.6 Предположительный бюджет научного исследования

Следующий раздел предлагает на рассмотрение одну из возможных ситуаций постановки бюджета для научного исследования. Следует отметить то, что в реальном проекте не было потрачено средств (не считая зарплату руководителя и т.п.) на само исследование. Единственным ресурсом являлось время. Поэтому для оценки бюджета предположим картину, когда теоретическое проектирование был уже проведено, и исследование подошло к этапу практической апробации с использованием оборудования, которое рассматривалось в предыдущих разделах.

При непосредственном планировании бюджета должно быть в полной мере отражены те или иные планируемые расходы, которых требует проект. Обозначим основные группы планируемых расходов как:

- Расход на оборудование, СОЖ и инструмент. (испытательные стенды, производственные станки);
- Расход на рабочий персонал (заработная плата, обучение и т.п.);
- Расход на материалы;
- Прочие расходы.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов).

Надо отметить, что для контроля качества в данном случае требуют не только классические измерительные приборы, но и программу Ansys-CFD v17.2 для контроля качества симуляции процесса перемешивания в ходе проектирования конструкции импеллеров, которая стоит около 40,000 Руб.

Таким образом обозначим планируемые затраты в таблице 4.

Таблица 4.

Вид работ	Сырье, материалы, покупные изделия и Ansys-CFD систему	Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Научные и производственные командировки	Оплата работ, выполняемых сторонними организациями и предприятиями	Прочие прямые расходы	Накладные расходы	Итого плановая себестоимость
Конструирование механизма	50	0	20	10	8	20	0	10	10	128
Разработка технологии производства механизма	20	0	20	10	8	20	0	10	10	98
Автоматизированный расчет	0	0	20	10	8	20	0	10	10	78
Контролировать качества	100	50	15	10	8	20	0	30	25	258
Испытание	30	60	15	10	8	20	50	15	10	218

\*Значения в ячейках указаны в тысячах рублей.

## 4. Раздел на иностранном языке

### Mixing Analysis in a Tank Using Computational Fluid Dynamics

---

#### Abstract

In this study computational fluid dynamics (CFD) approach was used to study mixing in an Industrial gold leaching tank. We use Ansys v17.2 to do the evaluation of fluid mixing efficiency. In this study we use three different mixer models to do the comparison. The objective was to analyze the extent of mixing in the tank by producing visual images of the various mixing zones in the tank domain. Eddy viscosity plots that characterise the extent of mixing in the tank were generated in the flow field obtained by an Eulerian-Eulerian approach. The extent of mixing was found to be greatest in the circulation loops of the impeller discharge region and least at the top and bottom portions of the tank. Trailing vortices that contribute to some level of mixing were identified in between the impeller blades. This approach could be used to enhance optimum design of mixing vessels and to eliminate the need for pilot plants.

#### Keywords

Computational Fluid Dynamics, Fluid Mixing, Mixing Efficiency, Residence Time Distribution, Eulerian-Eulerian Approach, Multiple Reference Frame, Eddy Viscosity Plot, Turbulent Schmidt Number, Ansys

---

#### 1. Introduction

Mixing by turbulent agitation plays a very important role in most industrial reactors including metallurgical reactors that are used during mineral processing. The main aim of mixing is to provide mass transfer of material to promote better contact between reactor contents in order to obtain the required product quality in the shortest possible time [1] [2]. However, due to improper reactor design, mixing operations in many industrial systems are either inefficient or more than enough. This leads to poor product quality and overconsumption of energy that eventually results in high production costs [3] [4]. The primary cause is the lack of understanding of the

mixing process which could be attributed to the complex nature of impeller-induced flows in stirred vessels equipped with baffles [5] [6]. Therefore, there is the need for in-depth studies of mixing operations to determine mixing efficiency and overall performance of mixing vessels. A good understanding of mixing operations in stirred vessels will enhance optimal design and help modify existing processes which could lead to minimum capital and running costs.

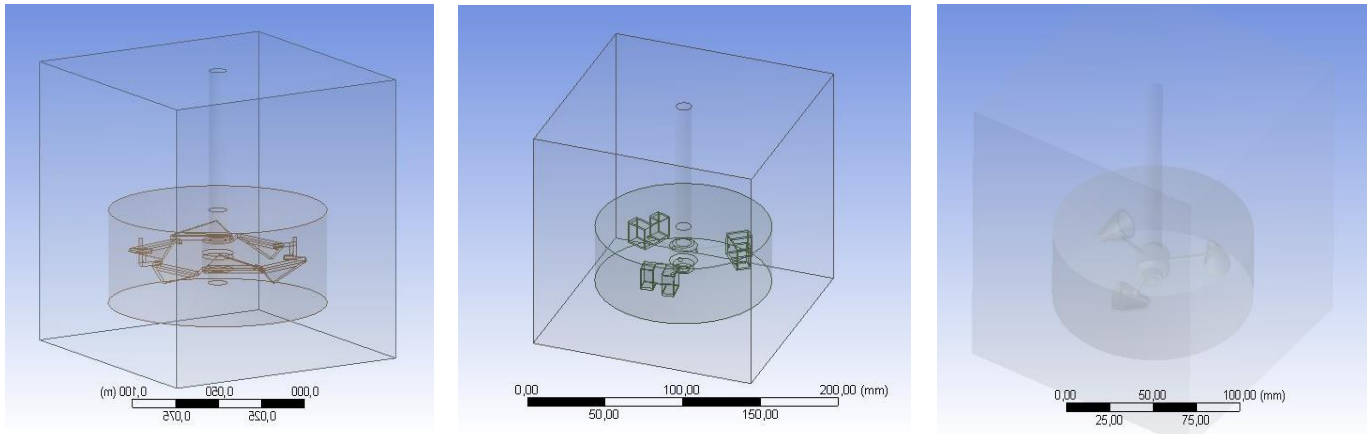
Residence time distribution (RTD) analysis has been established as the best experimental method to study the flow and mixing properties of any stirred vessel [7] [8]. Although the RTD method has been employed by most researchers including [9]-[13] to study the hydrodynamics of flow systems, the approach is not capable of providing explicit and detailed picture of the flowfield and thus the locations of the various mixing zones in stirred tanks. Therefore information from the RTD approach is not sufficient to completely understand the mixing process.

As a contribution to the understanding of mixing operations, the current study presents a comprehensive picture of the mixing process in stirred tanks. It provides visual images and data that are needed to address the problems associated with design and process scale-up of mixing systems. This was achieved by resorting to CFD which involves solving the macroscopic balance equations that describe fluid flow in a system [also known as the Navier Stokes (N-S) equations]. In stirred tanks, the N-S equations are limited to the mass and momentum equations. These equations were used in an earlier study conducted by [14] where appropriate CFD Models were employed to generate the flowfield in an industrial gold leaching tank. As a continuation, the current study was carried out with the objective to simulate the mixing zones in the flowfield generated in the previous investigation. Specifically, visual images of the various mixing zones were produced in order to analyze the extent of mixing in the tank.

## 2. Methodology

### 2.1. Computational Domain

The computational domain used for the simulation is an industrial gold leaching tank of 3000 m<sup>3</sup> volume. It is equipped with three baffles spaced uniformly around the vessel periphery as shown in **Figure 1**. Mixing is by mechanical agitation of two hydrofoil impellers, type A310 mounted on a shaft concentric with the axis of the vessel. Detail description of the domain and all the relevant dimensions,



such as tank height and diameter, im- peller diameter and clearance, are given in [14]. The MRF approach divides the computational domain into an inner region, in which the governing flow equations (continuity and momentum) are solved in a rotating frame- work and an outer region, in which the equations are solved in a stationary frame work [15].

**Figure 1.** Schematic diagram of computational domain.

## 2.2. Computational Models

The computational models and their mathematical expressions used in this study are well explained in [14]. An Eulerian-Eulerian multi-fluid model was used to simulate multiphase flow where the liquid and solid phases are all treated as different continua, interpenetrating and interacting with each other everywhere in the computational domain. The turbulent kinetic energy and turbulent energy dissipation rate were simulated using the most established standard  $k-\epsilon$  model because of its simplicity, low computational requirement and good convergence for complex turbulent flows [16] [17]. The movement of the impeller in the tank region was simulated using a multiple reference frame (MRF) approach. The simulation was performed using Fluent 17.2 solver where a control-volume-based technique was used to convert the general scalar transport equations to algebraic equations and then solved numerically using the pressure-based solver with segregated algorithm.

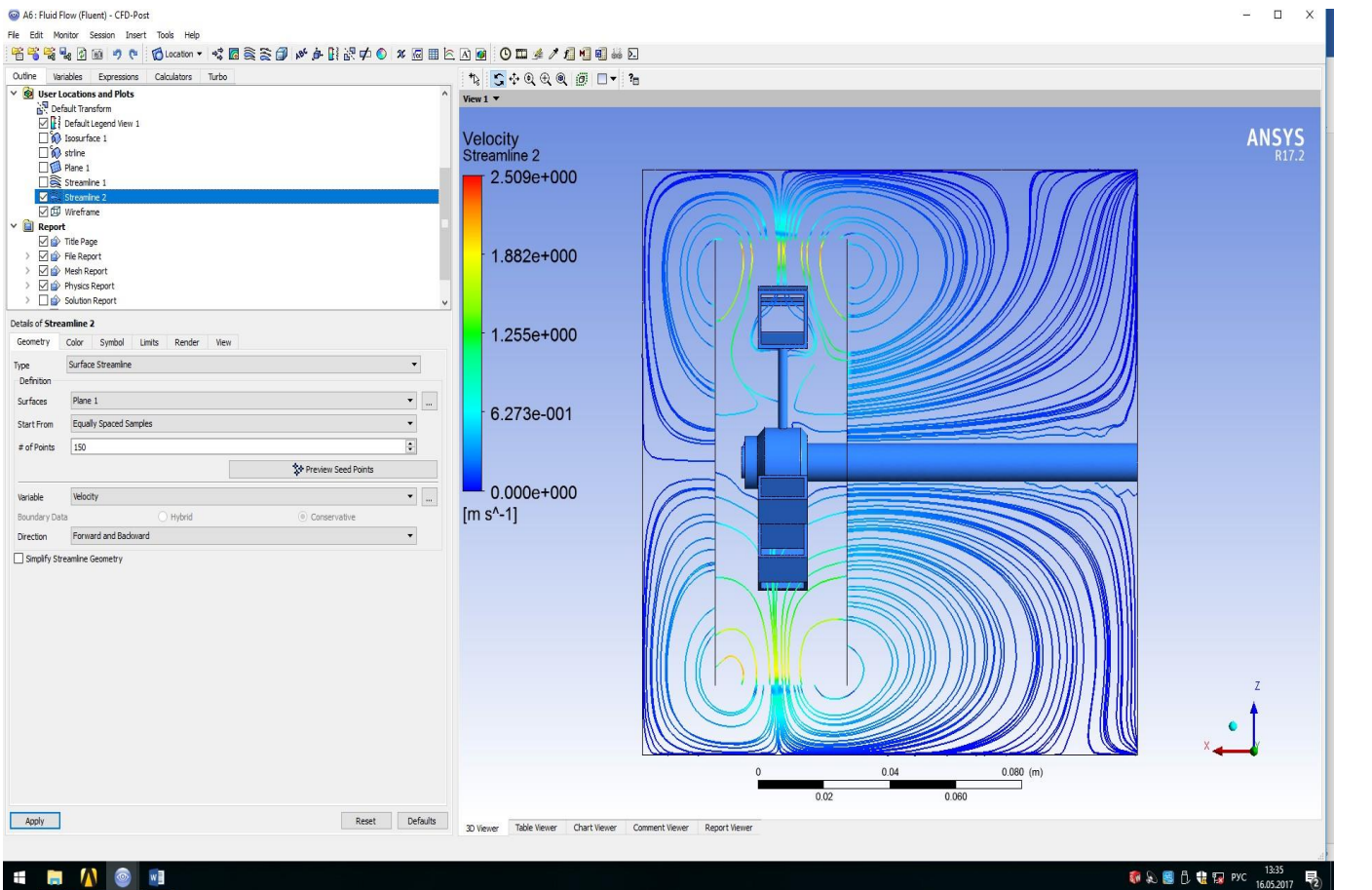
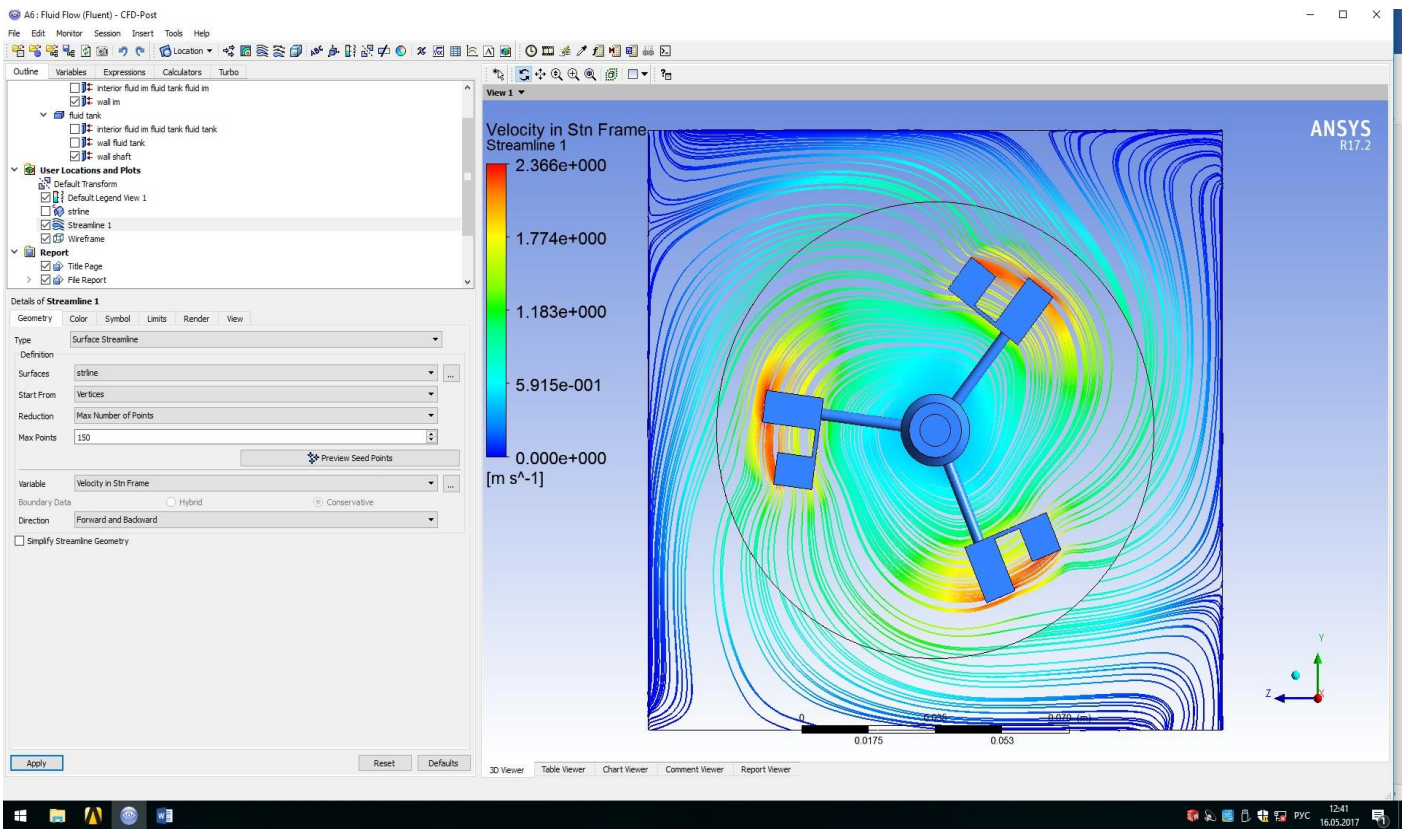
## 3. Results and Discussions

A mixing process requires sufficient input of energy which is readily available in a turbulent flow. In stirred tanks, turbulent diffusivity is the simplest approach for quantitative analysis of turbulent flows and mixing in general. Turbulent diffusion is usually described by a turbulent mass diffusion coefficient ( $D_t$ ), determined by the turbulent Schmidt number ( $S_{ct}$ ) as given in Equation.

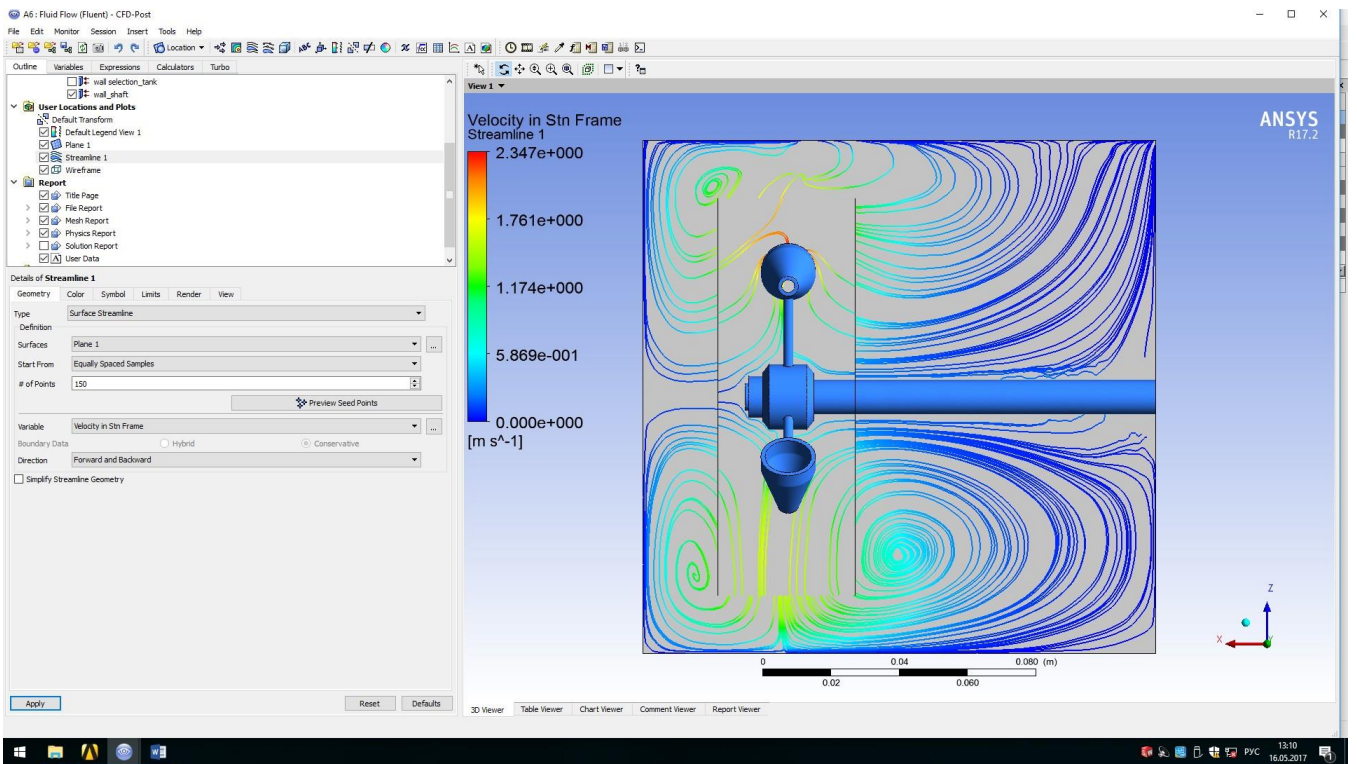
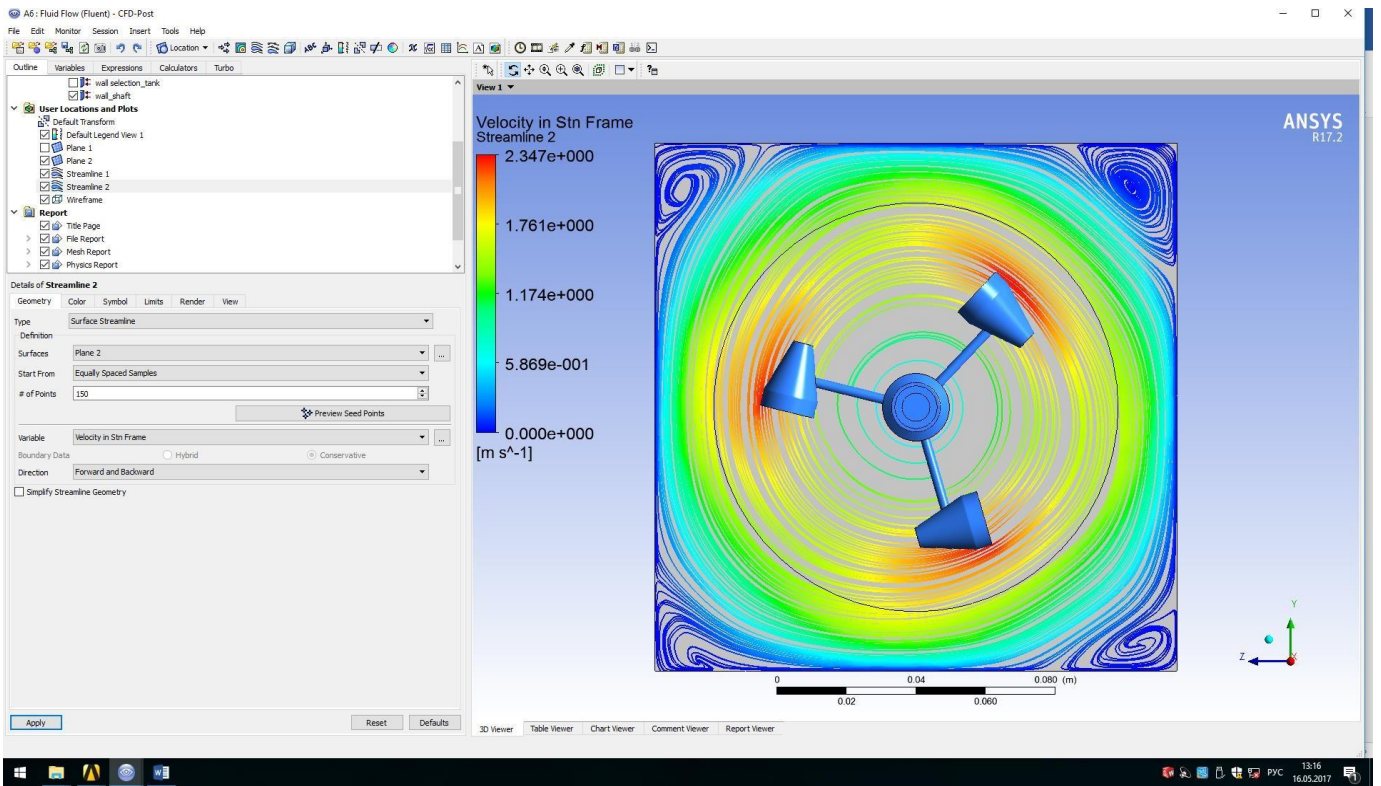
$$D_t = \frac{\mu_t}{\rho n_t}$$

Representative contour plots of velocity representing the extent of diffusion (mixing) in the tank are displayed in vertical and horizontal planes as shown respectively. The plots show varying magnitudes of eddy viscosity throughout the solution domain where the diffusive effect is greatest in the circulation regions and least at the top and bottom portions of the tank. Most of the mass and momentum transfer occur within the vortex core due to high levels of turbulence within the circulation regions resulting in high degree of mixing especially in the primary circulation loop. However, in the strong impeller discharge [14] the extent of mixing is relatively low. Even though the flow velocity is greatest in the impeller discharge, the flow in this region is similar to plug flow hence low level of mixing.









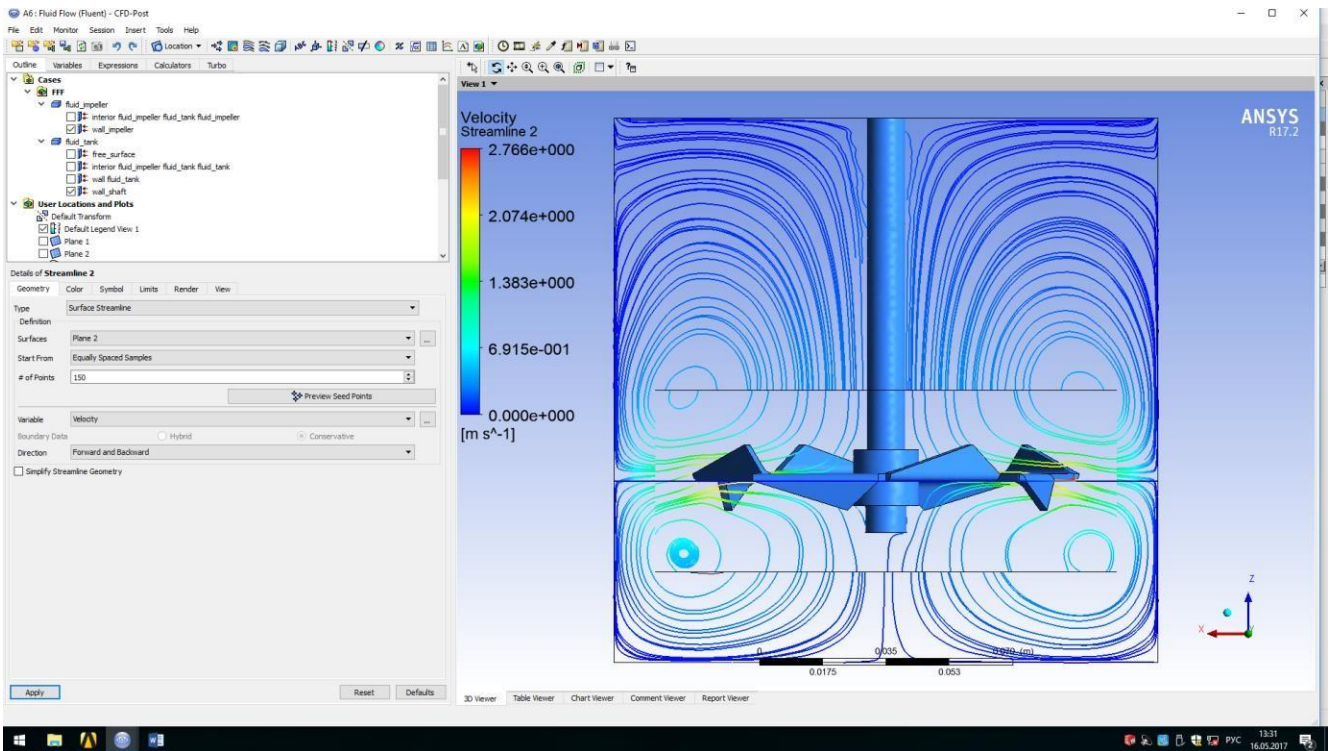
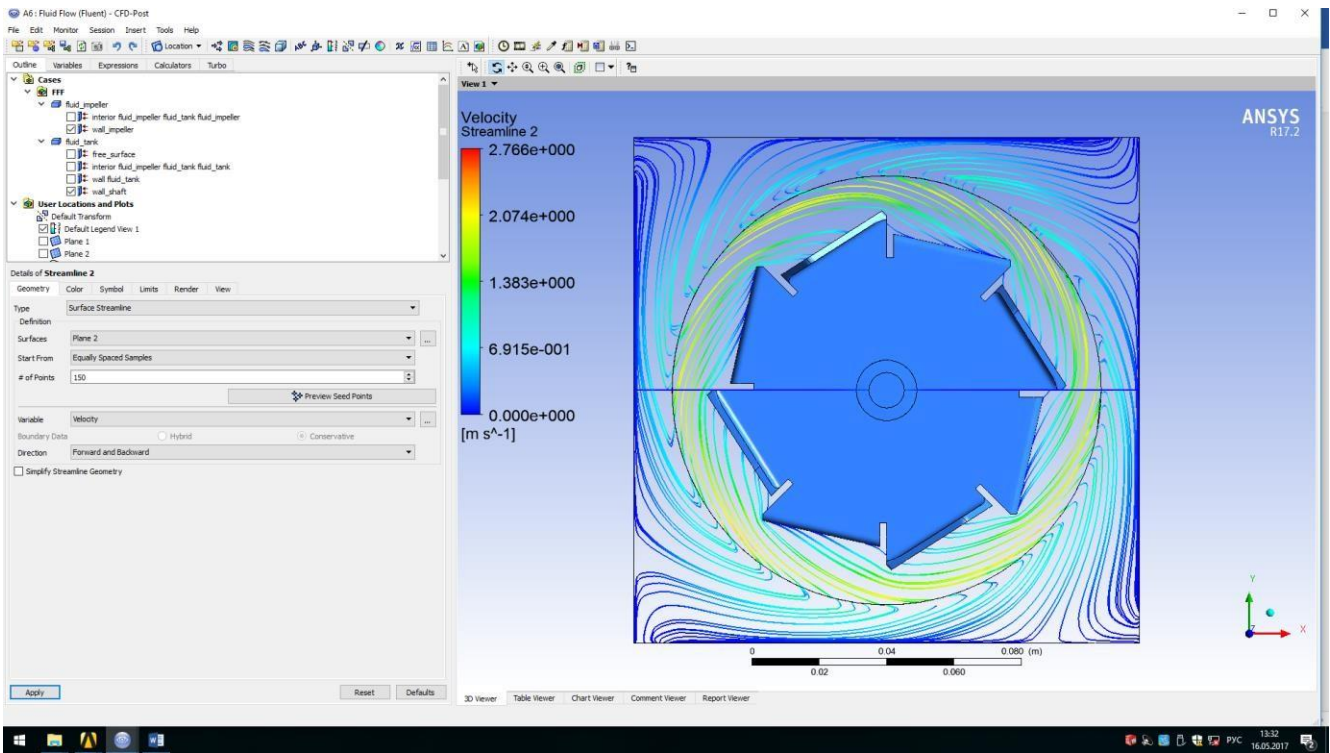


Figure 2. Contours of velocity [m/s] in vertical and horizontal plane.

In the above figures show that a vertical plane through the vortex region where the extent of mixing is more highlighted. The high level of mixing in this region is attributed to interaction resulting in intense flow dispersion.

Eddy viscosity plots in horizontal planes represent the mixing levels at various depths in the tank. Figures above also highlight the region of highest extent of mixing occurring in the primary circulation loop of the strong impeller discharge. A significant degree of mixing is observed in between the impeller blades as shown This brings into mind the effect of small vortices that trail each impeller blade. Trailing vortices [19] are attributed to the high turbulent kinetic energy produce by the blades. The trailing vortices contribute to some level of mixing in the high velocity region of the impeller discharge and at the top section of the tank away from the impeller shaft. Mixing at the bottom of the tank is mainly due to the dispersive effect of the secondary circulation loop located near the wall and baffles.

It is also observed that at the boundaries of the circulation loops the eddy viscosity values decrease gradually into the surrounding fluid zones especially in the axial direction. This clearly indicates some amount of flow exchange between different mixing compartments and confirms results obtained by [13] and [20] using an RTD Approach and a Compartment Model Approach (CMA) respectively.

The approach used in this study could therefore serve as a tool to validate hydrodynamic investigations conducted by tracer experimentation and other methods such as the CMA. More importantly, it eliminates the need for pilot plants to predict the mixing performance of stirred vessels as the choice of design features such as impeller type, number of impellers and impeller clearances that are necessary to achieve optimum mixing can easily be made by CFD simulation.

#### 4. Conclusions

Contours of turbulent eddy viscosity, representing the extent of mixing in stirred tanks, were plotted in the flow fields of a gold leaching tank that was generated by an Eulerian-Eulerian approach. The following conclusions were made on the extent of mixing in the tank.

- Mixing was not uniform throughout the tank as indicated by varying magnitudes of eddy viscosity in the tank domain.
- The extent of mixing is greatest in the circulation loops of the impeller discharge region and least at the top and bottom portions of the tank.
- Small vortices were observed trailing each impeller blade. They were responsible for some level of mixing in the high velocity region of the impeller discharge and at the top section of the tank.
- The approach used in this study gives a comprehensive picture of the mixing process in stirred tanks that will enhance optimum design of mixing vessels



## References

- [1] Rihani, R., Legrand, J. and Bensmaili, A. (2009) Mixing in Milli Torus Reactor under Aerated Conditions. *Chemical Engineering and Processing*, **48**, 1012-1019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2009.01.009>
- [2] Kunczewicz, C., Szulc, K. and Kurasinski, T. (2005) Hydrodynamics of the Tank with a Screw Impeller. *Chemical Engineering and Processing*, **44**, 766-774. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2004.08.006>
- [3] Distelho, M.F.W. and Marquis, A.J. (2000) Scalar Mixing in the Vicinity of Two Disk Turbines and Two Pitched Blade Impellers. *Chemical Engineering Science*, **55**, 1905-1920. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00464-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00464-9)
- [4] Jayanti, S. (2001) Hydrodynamics of Jet Mixing in Vessels. *Chemical Engineering Science*, **56**, 193-210. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509\(99\)00588-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00588-6)
- [5] Delvigne, F., Destain, J. and Thonart, P. (2005) Structured Mixing Model for Stirred Bioreactors: An Extension to the Stochastic Approach. *Chemical Engineering Journal*, **113**, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2005.06.007>
- [6] Raju, R., Balachandar, S., Hill, D.F. and Adriana, R.J. (2005) Reynolds Number Scaling of Flow in a Stirred Tank with Rushton Turbine. Part II—Eigen Decomposition of Fluctuation. *Chemical Engineering Science*, **60**, 3185-3198. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2004.12.040>
- [7] Gavrilescu, M., Radu, Z. and Tudose, R.Z. (1999) Residence Time Distribution of the Liquid Phase in a Concentric-Tube Airlift Reactor. *Chemical Engineering and Processing*, **38**, 225-238. [http://dx.doi.org/10.1016/S0255-2701\(99\)00005-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0255-2701(99)00005-7)
- [8] Stegowski, Z. and Furman L. (2004) Radioisotope Tracer Investigation and Modelling of Copper Concentrate Dewatering Process. *International Journal of Mineral Processing*, **73**, 37-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2003.08.003>
- [9] Pant, H.J., Sharma, V.K., Vidya Kamudu, M., Prakash, S.G., Krishnamoorthy, S., Anandam, G., Seshubabu Rao, P., Ramani, N.V.S., Singh, G. and Sonde, R.R. (2009) Investigation of Flow Behavior of Coal Particles in a Pilot-Scale Fluidized Bed Gasifier (FBG) Using Radiotracer Technique. *Applied Radiation and Isotopes*, **67**, 1609-1615. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.04.003>
- [10] Sugiharto, S., Suud, Z., Kurniadi, R., Wibisono, W. and Abidin, Z. (2009) Radiotracer Method for Residence Time Distribution Study in Multiphase Flow System. *Applied Radiation and Isotopes*, **67**, 1445-1448. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.02.073>
- [11] Ghiyas, U.D., Imran, R.C., Mansoor, H.I. and Iqbal, H.K. (2009) Study of Axial Mixing, Holdup and Slip Velocity of Dispersed Phase in a Pulsed Sieve Plate Extraction Column Using Radiotracer Technique. *Applied Radiation and Isotopes*, **67**, 1248-1253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.02.024>
- [12] de Andrade Lima, L.R.P. and Hodouin, D. (2005) Residence Time Distribution of a Mechanically Agitated Cyanidation Tank. *Minerals Engineering*, **18**, 613-621. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2004.10.006>
- [13] Dagadu, C.P.K., Akaho, E.H.K., Danso, K.A., Stegowski, Z. and Furman, L. (2012) Radiotracer Investigation in Gold Leaching Tanks. *Applied Radiation and Isotopes*, **70**, 156-161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.09.003>
- [14] Dagadu, C.P.K., Stegowski, Z., Furman, L., Akaho, E.H.K. and Danso, K.A. (2014) Determination of Flow Structure in a Gold Leaching Tank by CFD Simulation. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, **2**, 510-519. <http://dx.doi.org/10.4236/jamp.2014.27059>
- [15] Khopkar, A.R., Mavros, P., Ranade, V.V. and Bertrand, J. (2004) Simulation of Flow Generated by an Axial Flow Impeller: Batch and Continuous Operation. *Chemical Engineering Research and Design*, **82**, 737-751. <http://dx.doi.org/10.1205/026387604774196028>
- [16] Meroney, R.N. and Colorado, P.E. (2009) CFD Simulation of Mechanical Draft Tube Mixing in Anaerobic Digester Tanks. *Water Research*, **43**, 1040-1050. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.035>
- [17] Deglon, D.A. and Meyer, C.J. (2006) CFD Modelling of Stirred Tanks: Numerical Considerations. *Minerals Engineering*, **19**, 1059-1068. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2006.04.001>
- [18] ANSYS Fluent Inc. (2006) Fluent 6.3 User's Manual. Fluent Inc. Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, USA.
- [19] Yeoh, S.L., Papadakis, G. and Yianneskis, M. (2004) Numerical Simulation of Turbulent Flow Characteristics in a Stirred Vessel Using the LES and RANS Approaches with the Sliding/Deforming Mesh Methodology. *Chemical Engineering Research and Design*, **82**, 834-848. <http://dx.doi.org/10.1205/0263876041596751>
- [20] Vrabel, P., van der Lans, R.G.J.M., Luyben, K.C.A.M., Boon, L. and Nienow, A.W. (2000) Mixing in Large-Scale Vessels Stirred with Multiple Radial or Radial and Axial Up-Pumping Impellers: Modelling and Measurements. *Chemical Engineering Science*, **55**, 5881-589

## Список литературы

1. Food mixing : principles and applications [Текст] /P.J. Cullen [et al] — Blackwell Publishing Ltd , 2009 — 320 p. — ISBN 978-1-4051-7754-2
2. Paul, Edward L. Handbook of industrial mixing : science and practice [Текст]/ Edward L. Paul — Blackwell Publishing Ltd , 2004 — 1432 p— ISBN 0-471-26919-0,
3. Assirelli, W. Study Of Micromixing in a Stirred Tank Using a Rushton Turbine: Comparison of Feed Positions and Other Mixing Devices [Текст]/ W.Assirelli, A. Bujalski, W. Nienow, A. Eaglesham — Chemical Engineering Research and Design — 2002 — Vol.80, Issue 8 — p. 855-863
4. Брагинский, Л.Н. Перемешивание в жидких средах.[Текст]/ Л.Н. Брагинский В.И. Бегачев, В.М.Барабаш. — Л.: «Химия», 1984. — 336 с.
5. Review of the Main Mathematical Models Used in VisiMix [Электронный ресурс]/ VisiMix Ltd, Jerusalem , Israel — URL:<http://www.visimix.com/visimix-support/visimix-scientific-background/>
6. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками [Текст]/Ф. Стренк— Польша 1971, пер. с польского под ред. Шупляка И.А. — Л.: «Химия», 1975 — 384 с.
7. Анищенко, Л. М. Математические основы проектирования высокотемпературных технологических процессов / Л. М. Анищенко, С. Ю. Лавренюк. М.: Наука, 1986. 342 с.
8. Versteeg, Н. К. An Introduction to computational fluid dynamics: The finite volume methods approach / Н. К. Versteeg, W. Malalasekera. Prentice Hall, 1996.- 257 p.
9. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: Т.IV Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. М.: Физматлит, 2003. - 736 с.
10. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: Т.VIII Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е.М. Лившиц. М.: Физматлит, 2003,. -656 с
11. Andree, W. Modelling for design of industrial equipment and processes / W. Andree // Modeling for Electromagnetic Processing: Proceedings of the International Scientific Colloquium, Hannover, Marh 24-26, 2003 / Editor B. Nacke, E. Baake. P. 13-18
12. Umbrashko, E. LES-Modelling and Experimental Investigation of the Melt Flow in Induction Furnaces / A. Umbrashko, E. Baake, B. Nacke e.a. // Modeling for Electromagnetic Processing: Proceedings of the International

13. Scientific Colloquium, Hannover, Marh 24-26, 2003 // Editor B. Nacke, E. Baake.-P. 111-116.

14. Аксенов А. А. Сертификация системы моделирования движения жидкости и газа Flow Vision / А. А. Аксенов, В. В. Шмелев, М. Л. Смирноваи др. и др.// САПР и ГРАФИКА Вып.4, 2006. С. 80-85.

15. Zienkiewicz, O. C. The finite element method. Volume 1: The basis / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. Woburn: Butterwort-Heinemann, 2000. 712 p.

16. Moaveni S. Finite Element Analysy. Theory and Application with Ansys / S. Moaveni. // New Jersey :Prentice-Hall. 272 p.

17. Chung, T. J. Computational Fluid Dymanics / T. J. Chung // New York: Cambridge university press, 2002. 1027 p.

18. Бруббия, К. Методы граничных элементов: Пер. с англ. / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. Л.: Мир, 1987. - 524 с.

19. Ferziger, J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. H. Ferziger, M. Peric. New York: Springer, 2002. - 434 p.

20. Peyret, R. Handbook of computational fluid mechanics / R. Peyret. - London.:Academic Press, 2004.-467 p.

## Список литературы БЖД

1. Безопасность жизнедеятельности. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 2002. – 357с.
2. Гигиенические требования к ВДТ, ПЭВМ и организации работы. Санитарные правила и нормы 2.2.2.542 – 96. – М., 1996
3. Долин П.А. Справочник по технике безопасности. – М.: Высшая школа, 1991.
4. Основы противопожарной защиты предприятий ГОСТ 12.1.004 и ГОСТ 12.1.010 – 76.
5. Охрана окружающей среды. Под ред. С.В. Белова. – М.: Высшая школа, 1991.
6. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР, 6-е издание – Энергоатомиздат, 1996. – 640с.
7. Ревкин А.И. Инженерные вопросы радиогигиены при проектировании и эксплуатации источников излучения. – М.: МЭИ, 1987. – 58с.
8. СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение"
9. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Общие требования.
10. ГОСТ 12.1.030-81. Электробезопасность. Защитное заземление.
11. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
- ГОСТ 12.2.037-78. Техника пожарная. Требования безопасности
12. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к качеству атмосферного воздуха
13. ГОСТ 30775-2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами.
14. СНиП 21-01-97. Противопожарные нормы.
15. ГОСТ 12.4.154. Система стандартов безопасности труда.

## Список литературы по экономике

1. Видяев И. Г., Серикова Г. Н., Гаврикова Н. А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие //ИГ Видяев, ГН Серикова, НА Гаврикова, НВ Шаповалова, ЛР Тухватулина ЗВ Криницына. – 2014.