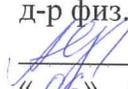
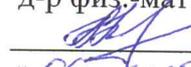


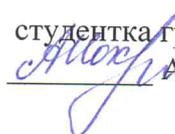
Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Физико-технический факультет
Кафедра математической физики

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК
Руководитель ООП
д-р физ.-мат. наук, профессор
 А. Ю. Крайнов
«06» июня 2018г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КАВИТАЦИИ
ПРИ РАБОТЕ ДИСКОВОГО ЗАВИХРИТЕЛЯ
по основной образовательной программе подготовки магистров направление
подготовки 16.04.01 — Техническая физика
профиль «Макрокинетика горения высокоэнергетических материалов»

Тохметова Айгерим Бауыржановна

Научный руководитель ВКР
д-р физ.-мат. наук, профессор
 Л. Л. Миньков
«06» июня 2018 г.

Автор работы
студентка группы № 10608
 А. Б. Тохметова

Министерство образования и науки Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Физико-технический факультет
Кафедра математической физики

Руководитель ООП

д.ф.-м.н., профессор

 А. Ю. Крайнов
«06 сентября» 2018 г.

Задание

на выпускную работу магистра ФТФ

Тохметовой Айгерим Бауыржановны

Тема работы: Численное моделирование возникновения кавитации при работе дискового завихрителя

Научный руководитель: Миньков Леонид Леонидович

Срок представления: 06 июля 2018 г.

№	Название раздела работы	Срок выполнения
1	Исследование влияния кавитации на дисковый завихритель для перемешивания расплавленного алюминия и частиц модификатора.	01.09.2017-31.10.2017
2	Участие во всероссийской конференции. Публикация статей в изданиях, входящих в базу цитирования SCOPUS.	01.11.2017-30.11.2017
3	Написание 2 главы магистерской диссертации.	01.12.2017-31.01.2018
4	Исследование возникновения кавитации	01.02.2018 -31.03.2018

	со сложным движением дискового завихрителя.	
5	Написание заключительной главы и заключения магистерской диссертации.	01.04.2018 -05.06.2018

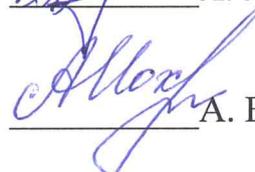
Рекомендуемая для изучения литература:

1. Ефимов В. А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. - М.: Новые технологии, 2004. - 784 с.
2. Ворожцов А.Б., Архипов В.А., Шрагер Э.Р. и др. Устройство для смешения жидкостей и порошков с жидкостью: заявка на патент № 2016130836 РФ. - Заявлено 26.07.2016.
3. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. - М.: Мир, 1974. -688 с.
4. Справочник химика/ под. ред. Б.П. Никольского. - М.-Л. Химия, 1982 - С. 682-693
5. Chhabra R. P., Richardson J. F. Non-Newtonian flow and applied rheology. Engineering applications. - Oxford: Elsevier, 2008. — 518p.
6. Заявка на патент № 2016130836 РФ. Устройство для смешения жидкостей и порошков с жидкостью / Ворожцов А. Б., Архипов В. А., Шрагер Э. Р., Даммер В. Х., Ворожцов С. А., Хмелева М. Г. Заявлено 26.07.2016.
7. Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат,1984. - 152 с.
8. ANSYS FLUENT Tutorial Guide: Release 14.0. 2011. ANSYS Inc.
9. Youngs D.L. Time-dependent multi material flow with large fluid distortion // Morton K.W., Baines M.J. (eds.). Numerical Modeling for Fluid Dynamics. New York: Academic Press, 1982. P. 273-285.
10. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии/ А.Г. Касаткин.-Изд. "Химия" М. 1971г. 784 с.

Руководитель работы


Л. Л. Миньков

Задание приняла к исполнению


А. Б. Тохметова

Аннотация

Цель: рассмотрение гидродинамики процесса перемешивания жидкого (расплавленного) металла в тигле при сложном движении завихрителя и оценка режимов работы перемешивающего устройства, при которых в расплавленном алюминии возникает гидродинамическая кавитация.

В данной работе проведено численное моделирование процесса перемешивания расплавленного алюминия при работе дискового завихрителя, выполненного в виде трех перфорированных дисков с расположенными на них штифтами.

На основе проведенных исследований показано, что гидродинамическая кавитация может являться причиной разрушения дискового завихрителя при работе в расплавленном алюминии, температура которого составляет 750 °С.

Annotation

The aim is to consider the hydrodynamics of the process of mixing the liquid (molten) metal in the crucible with the complex motion of the swirler and the evaluation of the operating conditions of the mixing device in which hydrodynamic cavitation occurs in the molten aluminum.

In the present work, numerical simulation of the process of mixing molten aluminum during the operation of a disk swirler, performed in the form of three perforated disks with contacts located on them, is shown.

Based on the research, it was proved that hydrodynamic cavitation caused the destruction of the disk swirler after operation in molten aluminum, the temperature of which was 750 °C.

Оглавление

Введение.....	5
1. Теоретическая часть	7
2. Численное моделирование перемешивания жидкости с помощью дисковой мешалки.....	21
2.1 Физическая постановка	21
2.2 Математическая постановка.....	24
3. Влияние кавитации на дисковый завихритель для перемешивания расплавленного алюминия и частиц модификатора.....	34
3.1 Описание проблемы.....	34
3.2 Влияние вращательного движения	36
3.3 Влияние вибрации.....	38
3.4 Условие возникновения кавитации на основе анализа теории подобия	45
4. Численное моделирование возникновения кавитации при сложном движении перемешивающего устройства	47
Заключение	50
Список литературы:	52

Введение

В данной работе рассматривается процесс перемешивания расплавленного алюминия с частицами модификатора в разливочном резервуаре с помощью гидродинамической мешалки. Моделируется картина течения в тигле, определяется характеристика завихрителя путем численного решения уравнения объемной доли, уравнения количества движения, уравнения турбулентной энергии и уравнения скорости диссипации в вычислительном пакете Ansys Fluent 14.0.

Исследовательская работа является актуальной, так как процесс перемешивания жидкого металла с частицами модификатора является механическим процессом для получения сплавов, обладающих улучшенными физико-механическими характеристиками.

Целью данной работы является: рассмотрение гидродинамики процесса перемешивания жидкого (расплавленного) металла в тигле; оценка режимов работы перемешивающего устройства, при которых в расплавленном алюминии возникает гидродинамическая кавитация; анализ возникновения кавитационного режима при сложном движении завихрителя.

Для достижения этой цели в магистерской диссертации поставлены следующие задачи:

- построение геометрии расчетной области на предпроцессоре GAMBIT;
- численное моделирование картины течения в тигле под действием завихрителя в пакете программ ANSYS FLUENT;
- исследование влияния вибрации завихрителя на перемешивание расплавленного металла;
- вывод зависимости критериев подобия процесса перемешивания методом анализа размерностей;

- рассмотрение возникновения кавитации при вибрировании и вращении дискового завихрителя.

Предмет исследования: гидродинамический смеситель, выполненный в виде трех перфорированных дисков с закрепленными на них штифтами.

Объект исследования: Гидродинамические процессы, возникающие в расплавленном алюминии, при воздействии на него вращающегося и вибрирующего завихрителя.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы.

1. Теоретическая часть

Механическими процессами называют процессы, в которых на продукт идет механическое воздействие. К ним относят: сортирование, измельчение, прессование, дозирование, формирование и перемешивание [1].

Сортирование.



Измельчение.

Измельчение – это механический процесс деления обрабатываемого продукта на части для его лучшего использования. В основном выделяют два вида: дробление и резание (Таблица 1).

Таблица 1

Дробление	Резание
Применяется для продуктов с низкой влажностью	Применяется для продуктов с высокой влажностью

Прессование.

Прессование – это процесс разрушения структуры продукта. Процессы прессования продуктов применяют в основном для разделения их на две фракции: жидкую и плотную от производства [2].

Дозирование и формирование.

Дозирование – процесс деления продукта на порции, а формирование – это процесс придания им формы.

Перемешивание.

Перемешивание – способ получения однородных смесей и интенсификация тепло- и массообмена в химической аппаратуре.

Интересна область интенсификации процессов массообмена, т. к. она протекает в различных неоднородных системах, таких как жидкость—жидкость, жидкость—газ или жидкость—твёрдое тело. В этих случаях наблюдается условия создания двухфазной системы — эмульсии или суспензии.

Любое сырьё и технические продукты подвергаются разделению на чистые вещества или, наоборот, для создания новых смесей. Смесей бывают гомогенными и гетерогенными [3].

Гомогенная смесь – это смеси любых газов, смеси некоторых жидкостей и твёрдых веществ, например сплавы. В гетерогенных смесях с помощью оптических приборов можно различить поверхности раздела разных веществ. Смесей образуются в результате смешивания различных компонентов. Смешивание является синонимом слова перемешивание, а также распространённый процесс химической технологии.

Смесь чаще всего представляется в виде:

- 1) Эмульсии (гомогенная дисперсионная система, которая состоит из двух несмешивающихся жидкостей);
- 2) Раствора (гомогенная смесь, состоящая из не менее двух компонентов, один из которых растворитель, другой растворимое вещество);
- 3) Суспензии (грубодисперсная система с твёрдой дисперсной фазой и жидкой дисперсионной средой);
- 4) Зернистой смеси (смесь, состоящая из большего количества зернистых частиц);

5) Газожидкостной смеси (многофазная дисперсионная система, свойства которой зависят от объема газа и жидкости).

Для перемешивания применяются механический, барботажный и циркуляционный способы (рис. 1.1).

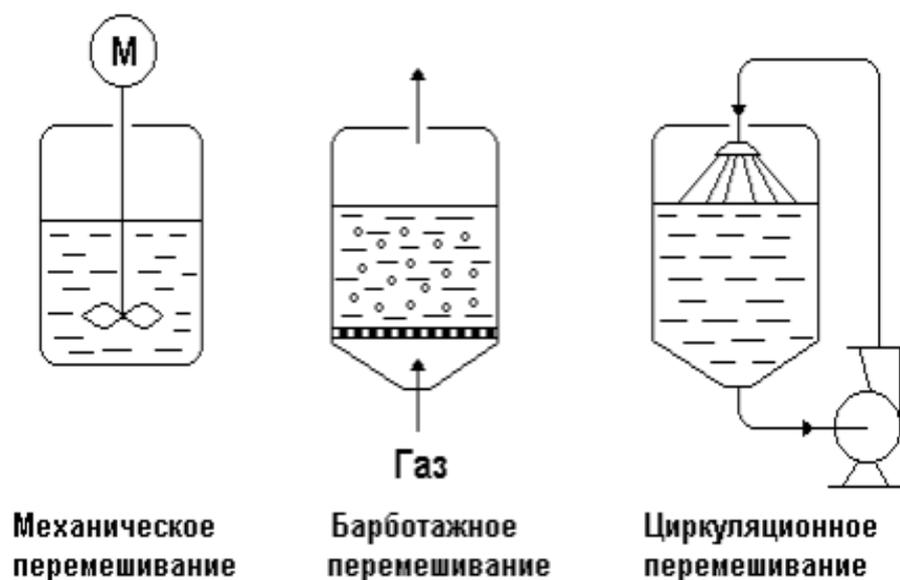


Рис. 1.1 Основные схемы перемешивания

–Механическое – перемешивание мешалками, вращающимися в аппарате с перемешиваемой средой.

–Барботажное – перемешивание путем пропускания через жидкую среду потока воздуха или газа, раздробленного на мелкие пузырьки, которые, поднимаясь в слое жидкости под действием Архимедовой силы, интенсивно перемешивают жидкость.

–Циркуляционное – перемешивание, когда газ подают через циркуляционную трубу. При транспортировке жидкости в трубах с большей скоростью происходит интенсивное перемешивание.

Также различают:

– Гравитационное перемешивание– это перемешивание сыпучих материалов вращающим барабаном, ось которого наклонена к горизонту. Частота вращения равна 5-10 об/мин [4].

– Электромагнитное перемешивание - это перемешивание маловязких жидкостей электромагнитными мешалками, на ось которых прикреплен электромагнит. Частота равна 24 Гц. Недостатки: низкая эффективность перемешивания и надежность на воздействие высокотемпературных сплавов.

Наибольшее распространение получил способ перемешивания с применением механических мешалок. Механическое перемешивание производится в емкостных резервуарах с перемешивающими устройствами и применяется для создания однородных растворов, эмульсий и суспензий, интенсификации процессов теплообмена и массообмена (чисто физического или в сочетании с химической реакцией) [5,6].

Мешалки разделяются на быстроходные и тихоходные. К быстроходным относят турбинные, пропеллерные, специальные и т.д. Эти мешалки могут создавать радиальный, осевой и радиально-осевой потоки жидкости в зависимости расположения их лопастей. Радиальное течение жидкости возникает в открытых турбинных мешалках с прямыми и изогнутыми лопастями, а также в турбинной мешалке закрытого типа. Осевое течение жидкости создают пропеллерные и шнековые мешалки с диффузором. Радиально-осевое течение жидкости турбинные мешалки с лопастями, расположенные под наклоном к плоскости вращения мешалки.

Быстроходные мешалки чаще всего работают в аппаратах с отражающими перегородками. Отсутствие отражающих перегородок приводит к завихрению жидкости и образованию воронки, как показано на рис. 1.2 [7].

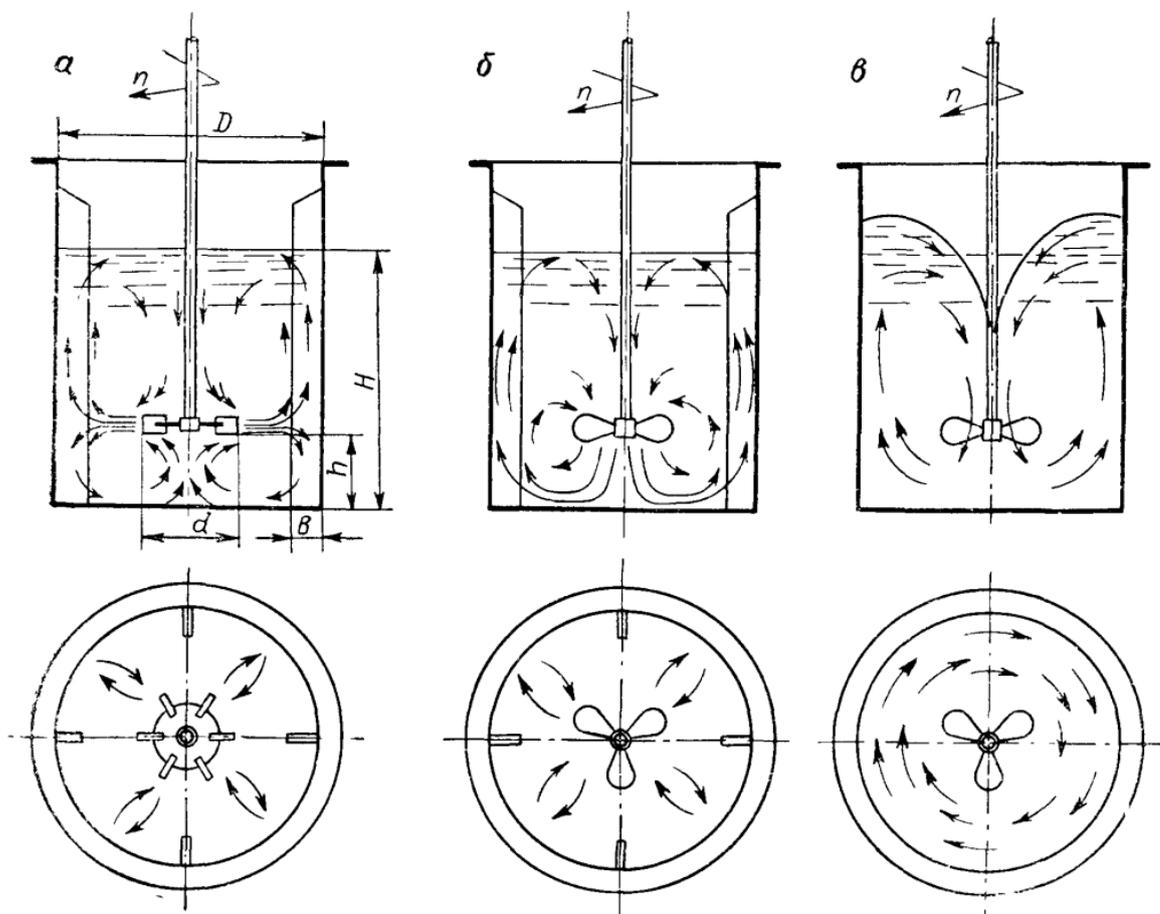


Рис. 1.2: Схема работы турбинных и пропеллерных быстроходных мешалок:
 а – турбинная, аппарат с перегородками; б – пропеллерная, аппарат с перегородками; в – турбинная или пропеллерная; аппарат без перегородок.

Перегородки могут располагаться у самой стенки, на некотором расстоянии от неё, либо под углом относительно радиуса вращения мешалки (рис. 1.3). Для небольшой вязкости применяется расположение а, расположение б применяется для жидкостей средней вязкости. Для жидкостей с большей вязкостью вообще не следует применять перегородки. При нахождении спирального змеевика следует устанавливать перегородки внутри змеевика.

К тихоходным перемешивающим устройствам относят ленточные, рамные, якорные, лопастные и шнековые мешалки. Они создают поток жидкости вокруг оси аппарата, который показан на рис. 1.4.

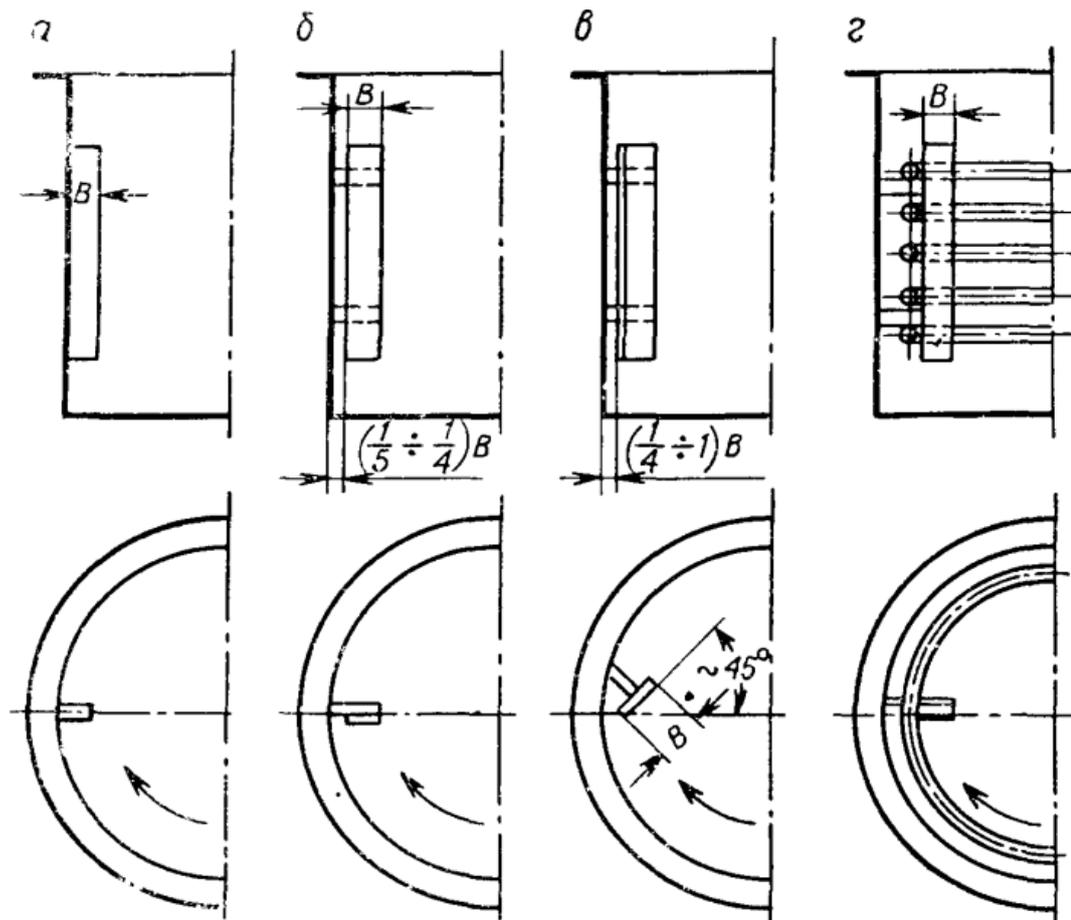


Рис. 1.3 Способы установки перегородок: *а*– для жидкостей с небольшой вязкости; *б*– для жидкостей со средней вязкостью; *в* – для жидкостей с большей вязкостью; *г* – для аппарата со змеевиком.

Специальные конструкции мешалок создают большие напряжения сдвига, к ним относят вибрационные, скребковые мешалки и т.д.

Поэтому при выборе мешалки надо руководствоваться опытом, накопленный на работе с промышленными установками. Ключевую роль играют физические параметры мешалки, а также вязкость.

По общему мнению, следует тихоходные мешалки применять для жидкостей с большой вязкостью, а быстроходные мешалки для жидкостей с низкой вязкостью.

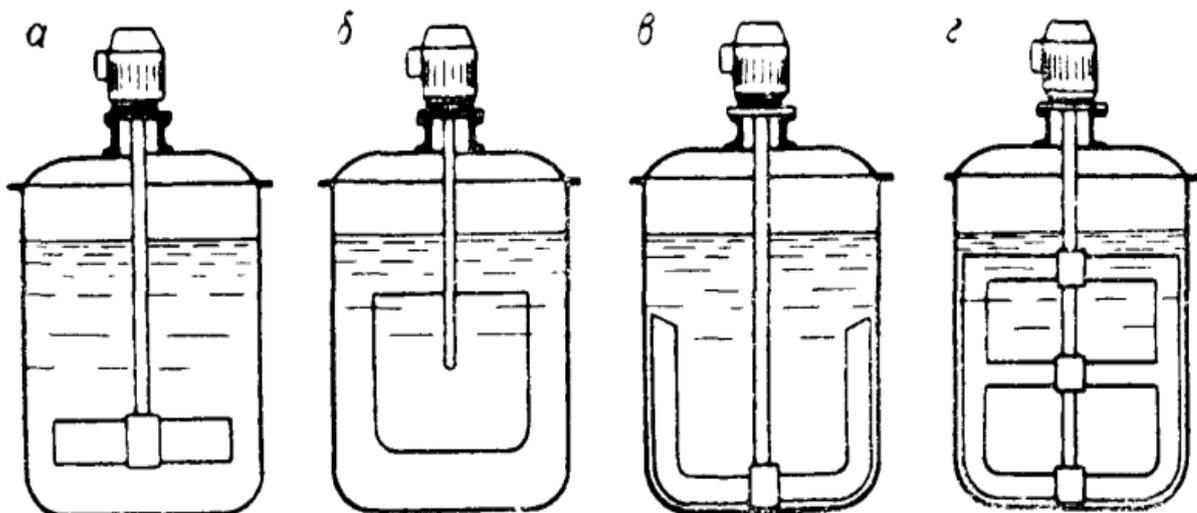


Рис. 1.4: Схема работы тихоходных мешалок:

a – лопастная мешалка; *б* – листовая мешалка; *в* – якорная мешалка; *z* – рамная мешалка.

Перемешивающее устройство (мешалка) состоит из одной или нескольких пар лопастей различной формы, закрепленных на стержне, который приводится во вращение от электродвигателя.

В зависимости от устройства лопастей мешалки можно разделить на следующие четыре группы:

- лопастные;
- пропеллерные;
- турбинные;
- специальные.

Лопастные мешалки. Мешалки лопастного типа – это низкооборотное устройство, состоящее из двух или более лопастей прямоугольного типа. Импеллер крепится на вращающемся валу. К лопастным мешалкам относятся рамные, якорные и листовые мешалки (рис. 1.5). Основное назначение якорных и рамных мешалок – это перемешивание вязких и твердых

жидкостей. При вращении эти мешалки очищают стенки и дно аппарата от залипающих загрязнений.

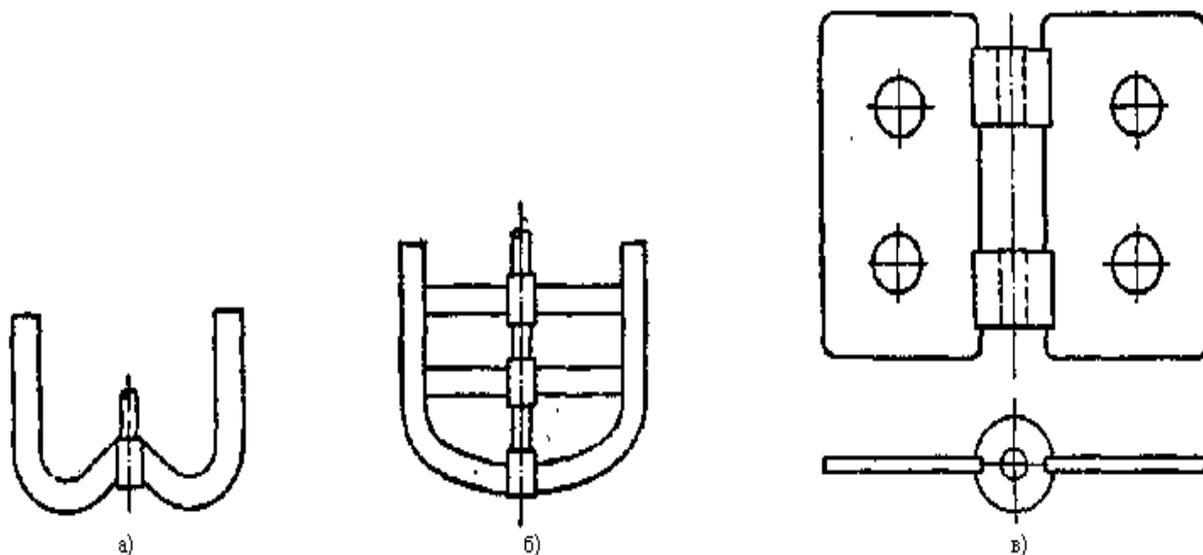


Рис. 1.5 а) якорная мешалка; б) рамная мешалка; в) листовая мешалка

Листовая мешалка обеспечивает тангенциальное течение перемешиваемой маловязкой среды и имеет лопасти большей ширины, чем у лопастных мешалок. Простота устройства и невысокая стоимость изготовления являются основным достоинством лопастных мешалок. К недостаткам устройства можно отнести слабый осевой поток, который не обеспечивает полного перемешивания всего объема жидкости в аппарате, т.е. мешалка перемешивает только те слои, которые расположены вблизи лопастей мешалки.

Турбинная мешалка. Эти мешалки имеют форму колес водяных турбин с плоскими, наклонными и криволинейными лопатками (рис. 1.6), укрепленные на вертикальном валу. В основном для турбинных мешалок характерны радиальные потоки, но при увеличении числа оборотов мешалки возможно тангенциальное течение и образование воронки.

Закрытые турбинные мешалки, в отличие от открытых турбинных мешалок имеют более выраженный радиальный поток [8]. Особенности

турбинных мешалок является быстрота перемешивания, растворение и эффективное перемешивание вязких жидкостей.

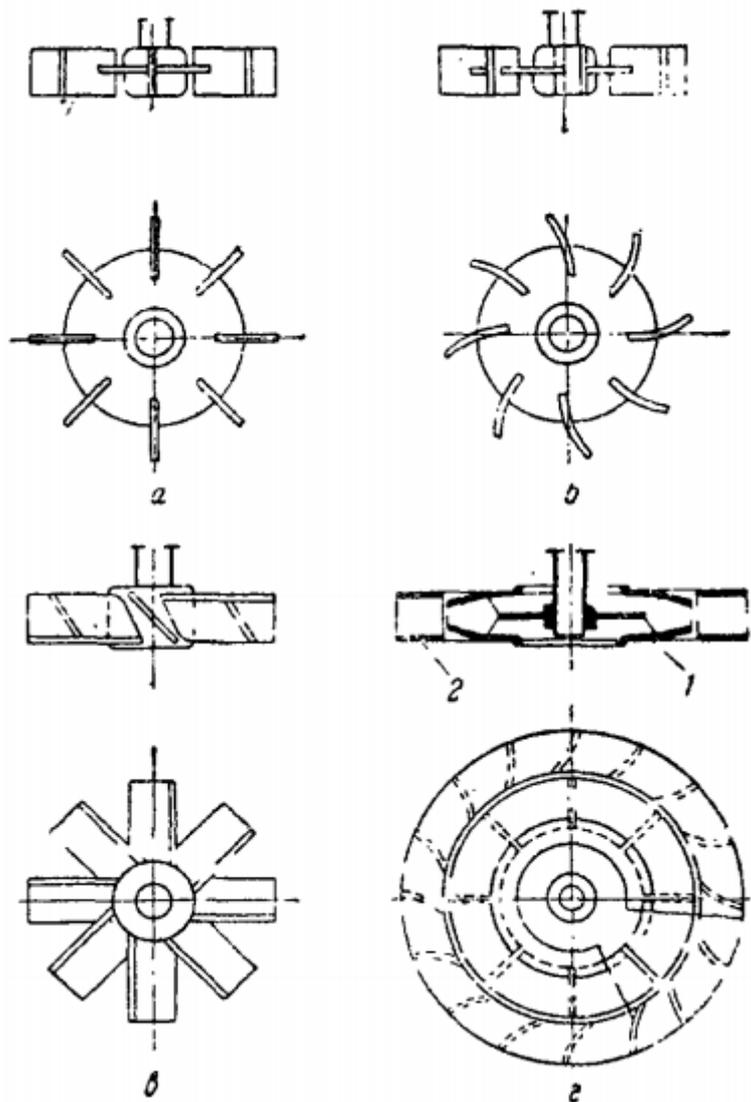


Рис. 1.6 Турбинные мешалки: *а* – открытая с прямыми лопатками, *б* – открытая с криволинейными лопатками, *в* – открытая с наклонными лопатками, *г* – закрытая с направляющим аппаратом; *1* – турбинная мешалка, *2* – направляющий аппарат

Пропеллерные мешалки. Рабочей частью перемешивающего устройства является пропеллер (рис. 1.7), выполненный в виде нескольких фасонных лопастей, изогнутых по профилю гребного винта. Самыми

распространёнными являются трехлопастные пропеллерные мешалки [9]. Основными достоинствами мешалки являются высокая скорость вращения и возможность непосредственного присоединения мешалки к электродвигателю, что приводит к уменьшению механических потерь. К недостаткам устройства можно отнести высокую стоимость изготовления и сложность конструкции.

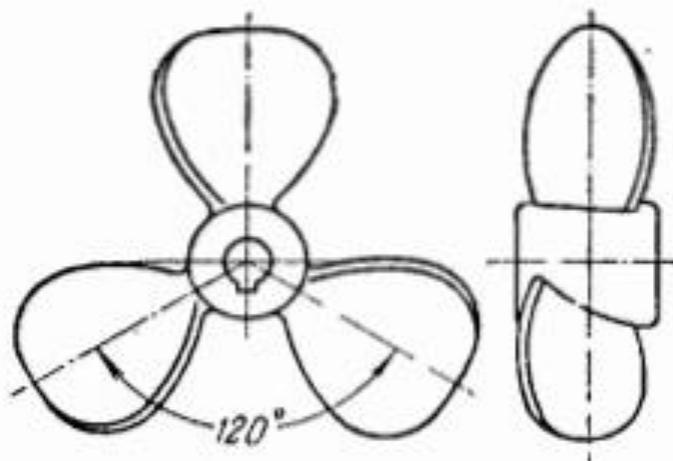


Рис. 1.7 Пропеллерная мешалка

Специальные мешалки. Широкое распространение среди этих мешалок получили барабанные, дисковые и вибрационные мешалки.

Вибрационные мешалки (рис. 1.8) сделаны в виде вала, с закрепленными на нем одним или несколькими перфорированными дисками. Они используются для перемешивания жидких смесей и суспензий.

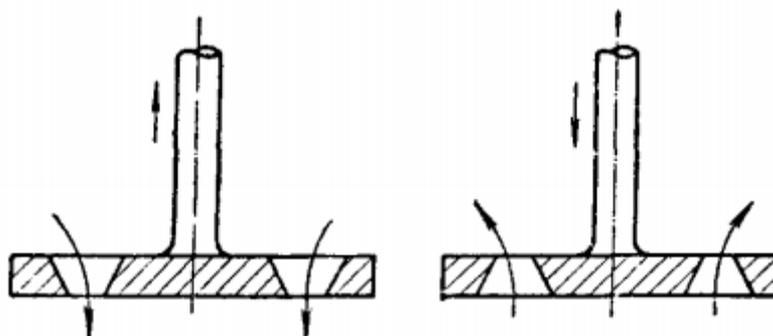


Рис. 1.8 Устройство дисков вибрационных мешалок

Барабанные мешалки [10] (рис. 1.9) состоят из двух цилиндрических колец, соединенных между собой вертикальными лопастями прямоугольного

сечения. Эти мешалки создают осевой поток и применяются для создания эмульсий и суспензий.

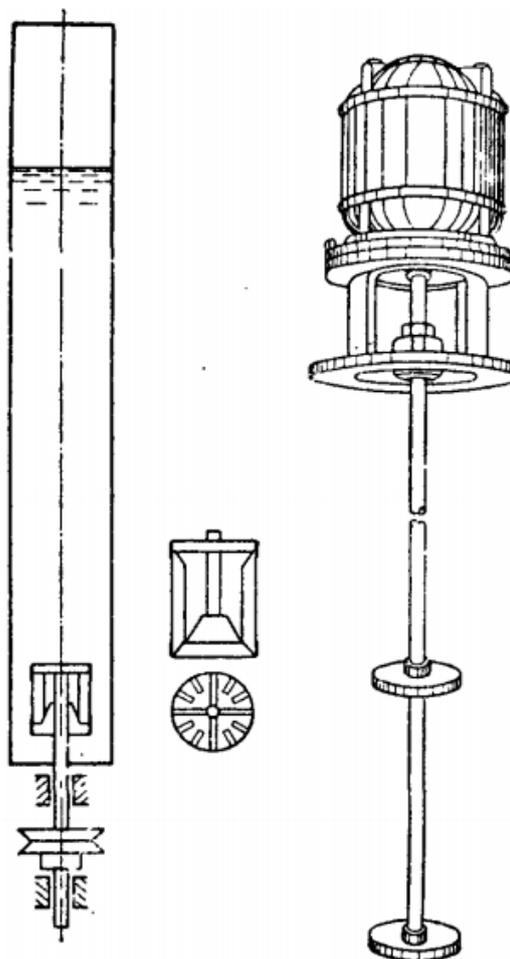


Рис. 1.9 Барабанная и дисковая мешалка

Дисковые мешалки (рис. 1.9), выполненные в виде одного или нескольких гладких дисков, прикрепленных к вертикальному валу, создают тангенциальное течение перемешиваемой среды [11].

Пневматическое перемешивание [12] используется, когда перемешивание жидкости отличается высокой химической активностью и быстрым разрушением механических мешалок. Перемешивание сжатым газом проводится в специальных аппаратах – барботерах, которые расположены по дну аппарата трубы с отверстиями.

В циркуляционном перемешивании пузырьки газа увлекают за собой вверх по трубе жидкость, находящиеся в сосуде, которая затем опускается вниз в кольцевом пространстве между трубой и стенками аппарата и тем самым обеспечивает циркуляционное движение.

Наиболее важными характеристиками перемешивающих устройств являются эффективность перемешивающего устройства и интенсивность перемешивания.

Эффективность перемешивания обеспечивается выбором параметров аппарата, перемешивающего устройства, числа оборотов мешалки, обеспечивающих равномерность концентрации смеси в аппарате с заданной интенсивностью (т.е. за заданное время) [13].

Интенсивность перемешивания [14] определяется временем достижения заданного технологического результата или числом оборотов мешалки при фиксированной продолжительности процесса (для механических мешалок). Чем выше интенсивность перемешивания, тем меньше времени требуется для достижения заданного эффекта перемешивания. Интенсификация процессов перемешивания приводит к уменьшению размеров проектируемой аппаратуры и увеличению производительности действующей.

Критерии подобия, применяемые для описания процессов перемешивания

Для процессов, осуществляемых с помощью перемешивающих устройств, определяются критерии, в которых входит окружная скорость ω . Чаще всего пользуются скоростью, равной окружной скорости конца лопастей мешалки. Полученные таким образом критерии действительны для процессов перемешивания [4].

Ниже представлены критерии, применяемые для описания процессов перемешивания:

- $Str = \frac{\tau\omega}{l}$ – критерий Струхаля, характеризующий неустановившейся характер течения жидкости;
- $Fr = \frac{\omega^2}{gl}$ – критерий Фруда, характеризующий подобие явлений течения, обусловленных действием силы тяжести;
- $Eu = \frac{\Delta p}{\gamma\omega^2}$ – критерий Эйлера, характеризующий подобие явлений течения, обусловленных действием внешних сил;
- $Re = \frac{\omega\gamma l}{\nu}$ – критерий Рейнольдса, характеризующий подобие явлений в потоке жидкости, обусловленных действием сил инерции и внутреннего трения,

где τ – время, c ; ω – угловая скорость мешалки, $рад/c$; l – линейный размер, $м$; g – ускорение свободного падения, $\frac{м}{c^2}$; p – рабочее давление в аппарате, $Па$; γ – плотность, $\frac{кг}{м^3}$; ν – кинематический коэффициент вязкости, $\frac{м^2}{c}$.

Анализ размерностей

Определить критерии подобия в реальных процессах очень сложно, поэтому в таких случаях лучше воспользоваться методом анализа размерностей. Метод включает в себя следующие этапы:

- 1) Размерность физической величины представляется в виде произведения с учетом показателей их степени, например скорость:

$$[м \cdot c^{-1}], \dots$$

- 2) Каждое уравнение

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = 0$$

с n размерными величинами, представляется в виде уравнения с N безразмерными комплексами

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N) = 0$$

Это – формулировка π – теоремы Бэкингема. Для определения безразмерных комплексов, искомую функцию представляют в виде:

$$A = C \alpha_1^{m_1} \alpha_2^{m_2} \dots$$

Затем путем последовательного сравнения [м], [кг] и т.д. находим показатели степеней $m_1, m_2 \dots$, и наконец, получаем с помощью преобразований безразмерные комплексы π_k .

Компьютерное моделирование физических процессов в перемешивающем устройстве

Редко удается решить аналитически проблему процессов перемешивания потому, что течение жидкости в перемешивающем устройстве носит сложный характер. В таких случаях, на основе математической модели процесса, строят компьютерную модель, которая требует наименьших материальных затрат и позволяет выявить основные закономерности процесса. Первым шагом для создания законченной компьютерной модели является построение геометрической формы сосуда с находящимся в нем перемешивающим устройством, которое может быть выполнено в предпроцессоре Gambit [15]. Для имитации процесса перемешивания используют современный универсальный программный комплекс Fluent [16], предназначенный для решения задач механики жидкости и газа.

2. Численное моделирование перемешивания жидкости с помощью дисковой мешалки

2.1 Физическая постановка

Данная работа посвящена процессу перемешивания жидкого металла в тигле под действием завихрителя (рис. 2.1), выполненного в виде трех перфорированных дисков с размещенными на них штифтами [17].

В этой главе рассматривается гидродинамика процесса перемешивания расплавленного металла; а также исследуется влияние скорости вращения перемешивающего устройства на картину течения в тигле.

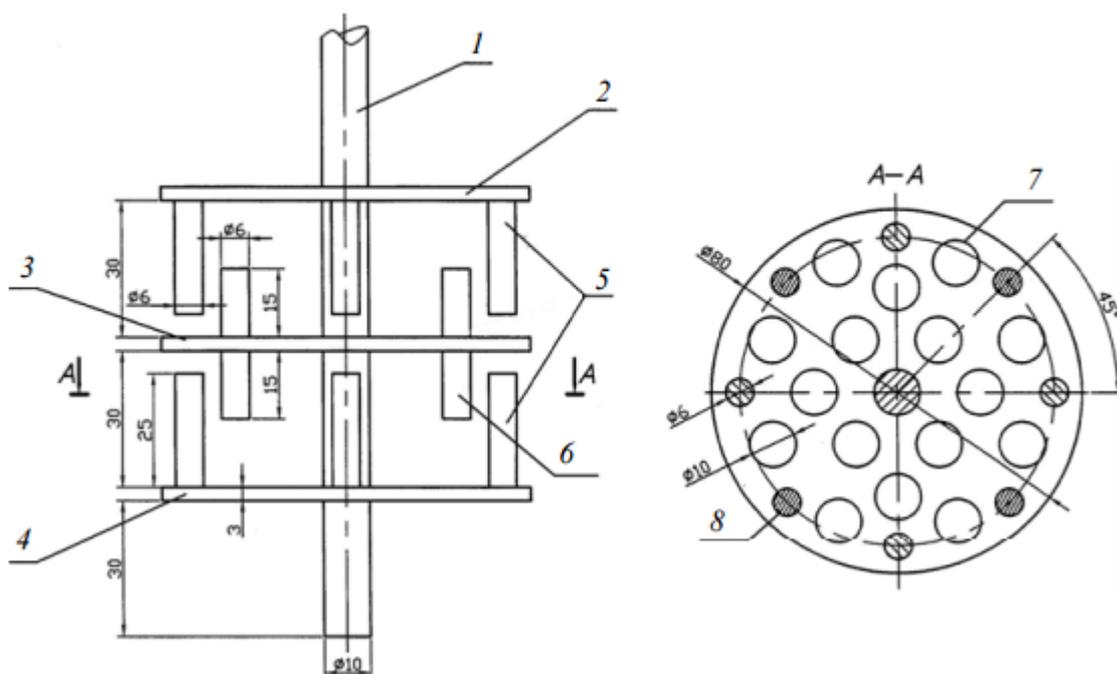


Рис. 2.1 Форма завихрителя.

1 – ось; 2-4 – перфорированные диски; 5, 6 – штифты; 7 – отверстия; 8 – штифты центрального диска

Техническим результатом изобретения [18] является наиболее полное смешивание разных жидкостей, замешивание твердых микрочастиц в

жидкость для получения однородного состава и равномерного по объему распределения твердых частиц. Из описания следует, что он достигается тем, что разработано устройство для смешивания жидкостей и порошков с жидкостью в резервуаре, содержащее стержень с закрепленным на одном конце рабочим органом с возможностью его вращения и продольного колебательного перемещения.

Стержень с рабочим органом выполнен с возможностью перемещения в резервуаре в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Рабочий орган (рис. 2.2) выполнен в виде трех дисков, жестко закрепленных на стержне на одинаковом расстоянии друг от друга. По периферии поверхностей крайних дисков соосно установлено 4 цилиндрических штифта, направленных свободными концами в сторону центрального диска и смещенных относительно друг друга по поверхности диска на одинаковый угол $\alpha = 90^\circ$. На каждой из поверхностей центрального диска установлено



Рис. 2.2 Устройство для смешивания жидкостей и порошков с жидкостями

соосно 4 цилиндрических штифтов, смещенных относительно штифтов крайних дисков на угол 45° . На каждом из дисков выполнены сквозные

отверстия, равномерно расположенные по их поверхности. Скорость вращения стержня составляет $(500 \div 2700)$ об/мин, частота его продольных колебаний составляет $(5 \div 30)$ Гц, а амплитуда колебаний составляет не менее 0.8 см. Расстояние между дисками, высота и диаметр штифтов, суммарная площадь отверстий в диске и их диаметр определяются соотношениями:

$$H = (0.3 \div 0.4)D,$$

$$h_1 = (0.8 \div 0.9)H,$$

$$h_2 = (0.45 \div 0.55)H,$$

$$d = (0.07 \div 0.08)D,$$

$$S_{отв} = (0.2 \div 0.3)\pi D^2 / 4,$$

$$d_{отв} = (0.1 \div 0.2)D,$$

где H – расстояние между дисками; D – диаметр дисков; h_1 – высота штифтов, установленных на крайних дисках; h_2 – высота штифтов, установленных на центральном диске; d – диаметр штифтов; $S_{отв}$ – суммарная площадь отверстий в диске; $d_{отв}$ – диаметр отверстий.

2.2 Математическая постановка

При описании процесса перемешивания используются следующие допущения: жидкость несжимаемая, течение является нестационарным, изотермическим, турбулентным, течение вращающейся жидкости обладает осевой симметрией.

Для описания положения границы жидкий металл – воздух используется модель VOF, для описания турбулентного течения применяется классическая $k - \varepsilon$ модель. Основная система уравнений записывается во вращающейся системе координат со скоростью равной скорости завихрителя и выглядит следующим образом [19]:

- изменение объемной доли воздуха

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial t} + \nabla(\alpha_2 V_r) = 0; \quad (2.1)$$

- изменение объемной доли жидкого металла

$$\alpha_1 = 1 - \alpha_2; \quad (2.2)$$

- изменение количества движения смеси

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + \nabla(\rho V_r V) + \rho \omega \times V = -\nabla p + \nabla \overline{\tau_{eff}} + F_{n.n.} + F_g; \quad (2.3)$$

- изменение турбулентной кинетической энергии

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho k V_r) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_{turb}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon; \quad (2.4)$$

- изменение скорости диссипации турбулентной кинетической энергии

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\rho \varepsilon V_r) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_{turb}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (2.5)$$

где $\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2$ - плотность смеси;

ρ_1 – плотность расплавленного металла;

ρ_2 – плотность воздуха;

ω – угловая скорость вращения завихрителя;

$V_r = V - \omega \times r$ – скорость смеси в системе координат, связанной с завихрителем;

r – расстояние от оси вращения до рассматриваемой точки;

$F_{n.n.} = 2\sigma k \frac{\rho}{\rho_1 + \rho_2} \nabla \alpha_1$ – сила поверхностного натяжения;

$k = \nabla \left(\frac{n}{|n|} \right)$ – кривизна поверхности раздела фаз;

$n = \nabla \alpha_1$ – нормаль к поверхности раздела фаз;

σ – коэффициент поверхностного натяжения;

$F_g = (-\rho g, 0)$ – сила тяжести;

$\overline{\tau}_{eff} = \overline{\tau} + \overline{\tau}_{turb}$ – эффективный тензор напряжений;

$\overline{\tau}_{turb} = \mu_{turb} (\nabla V + \nabla V^T)$ – тензор вязких напряжений;

$\overline{\tau}_{turb} = \mu_{turb} (\nabla V + \nabla V^T) - \frac{2}{3} \rho k U$ – тензор турбулентных напряжений;

$\mu = \mu_1 \alpha_1 + \mu_2 \alpha_2$ – динамическая вязкость смеси;

$\mu_{turb} = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}$ – турбулентная вязкость;

$G_k = 2\mu_{turb} S : S$ – производство турбулентной кинетической энергии вследствие сдвигового течения (действие градиентов скорости);

$S = \frac{1}{2} (\nabla V + \nabla V^T)$ – тензор деформаций.

В уравнениях (2.3), (2.4) используются следующие параметры:
 $C_{1\varepsilon} = 1.44; C_{2\varepsilon} = 1.92; C_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3.$

На твердых поверхностях тигля и завихрителя задаются условия прилипания [20], на открытой границе тигля – «мягкие» граничные условия

[21]. Для решения системы уравнений (2.1), (2.3) - (2.5) применяется метод конечных объемов. Уравнение (2.1) решается по явной схеме с использованием метода геометрической реконструкции для определения потоков на гранях ячеек, находящихся вблизи поверхности раздела фаз. Для уравнений (2.3) - (2.5) используется неявная схема, причем для аппроксимации конвективных членов применяется противопоточная разностная схема второго порядка аппроксимации. Поле давления находится с помощью использования алгоритма PRESTO [22]. Согласование поля давления и поля скоростей осуществляется по методу SIMPLE [23]. Модель EWT (Enhanced Wall Treatment) определяет значения параметров турбулентности на твердых поверхностях тигля и завихрителя. Задача решается с помощью пакета программ Ansys-Fluent [19].

Ниже приведены значения параметров, которые использовались при решении поставленной задачи:

- плотность жидкого металла $\rho_1 = 2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- плотность воздуха $\rho_2 = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- динамическая вязкость расплавленного металла $\mu_1 = 10^{-3} \text{Па} \cdot \text{с}$;
- динамическая вязкость воздуха $\mu_2 = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{Па} \cdot \text{с}$;
- поверхностное натяжение жидкого металла $\sigma = 0,9 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$;
- скорость вращения завихрителя $n = 100 - 3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$;
- высота тигля 0,3 м, диаметр 0,2 м.

В начальный момент времени высота уровня жидкого металла составляла половину высоты тигля.

2.3 Обсуждение результатов

Решение системы уравнений будет зависеть от безразмерных критериев, для их определения введем некоторые масштабы:

- масштаб длины d - внешний диаметр завихрителя;
- масштаб времени ω^{-1} , где ω - угловая скорость вращения завихрителя;
- масштаб плотности ρ_1 - плотность жидкого металла;
- масштаб давления $\rho_1(\omega d)^2$;
- масштаб скорости ωd .

Масштаб скорости и давления получены согласно теории размерностей. При записи безразмерного вида уравнения (2.2) появляются следующие безразмерные критерии: число Фруда $Fr = \frac{\omega^2 d}{g}$, число

Рейнольдса $Re = \frac{\rho_1 \omega d^2}{\mu}$ и число Вебера $We = \frac{\rho_1 \omega d^2}{\mu}$ Безразмерной

энергетической характеристикой завихрителя служит модифицированное

число Эйлера $Eu = \frac{P}{\rho_1 \omega^3 d^5}$, характеризующее отношение мощности

завихрителя P к мощности вращающейся жидкости [1,7].

При отношении характерных размеров перемешивающего устройства и тигля получаем безразмерный геометрический параметр, $\frac{d}{D}$.

Течение расплавленного металла в тигле является турбулентным. На это указывают значения безразмерных параметров при скорости вращения завихрителя от 100 об/мин до 3000 об/мин:

- $Re: 1.8 \cdot 10^5 - 5.4 \cdot 10^6$;
- $We: 1.7 \cdot 10^2 - 1.5 \cdot 10^5$;

- $Fr: 0.9 - 805$.

В результате, инерционные силы намного превышают силы вязкости, силу поверхностного натяжения, а также силу тяжести. Ключевую роль вблизи стенок тигля играют силы поверхностного натяжения и силы тяжести.

В таблице приведены значения момента сил при скорости вращения завихрителя равной 1500 об/мин , которые были получены для исследования на сходимость численного решения. Момент сил действует на завихритель со стороны расплавленного металла. Расчеты проводились на четырех разностных сетках с размерами ячеек, которые уменьшались от 2 мм до 0.25 мм (Таблица 2). Основная система уравнений (2.1)-(2.5) решалась до тех пор, пока решение не сходилось к стационарному. За «точное» значение момента сил принимается решение, полученное на разностной сетке 0.25 мм . При определении момента сил, можно наблюдать, что относительная погрешность уменьшается при увеличении размера ячеек. Отсюда следует, что существует сходимость численного решения. Ниже проведены расчеты с разностной схемой, число ячеек которой равно 119216 , а размер ячеек 0.5 мм .

Таблица 2

Параметры	Размер ячеек h , мм			
	2	1	0.5	0.25
N ячеек	8001	29804	119216	476864
M , Н·м	0.2016	0.2151	0.2211	0.2226
$(\Delta M/M) \cdot 100 \%$	10.44	3.52	0.69	

На рис. 2.3 можно наблюдать увеличение глубины воронки при увеличении скорости вращения перемешивающего устройства за счет центробежных сил, которые отталкивают жидкий металл на периферию. При скорости вращения 500 об/мин глубина воронки достигает верхнего перфорированного диска, при 1000 об/мин – среднего перфорированного диска. При скорости вращения завихрителя 1500 об/мин и выше глубина воронки достигает нижнего диска, и вследствие этого площадь поверхности соприкосновения расплавленного металла и завихрителя уменьшается. При соприкосновении жидкого металла и воздуха в области штифтов, мы

можно наблюдать проникновение воздуха в жидкий металл, что создает предпосылки для возникновения кавитации.

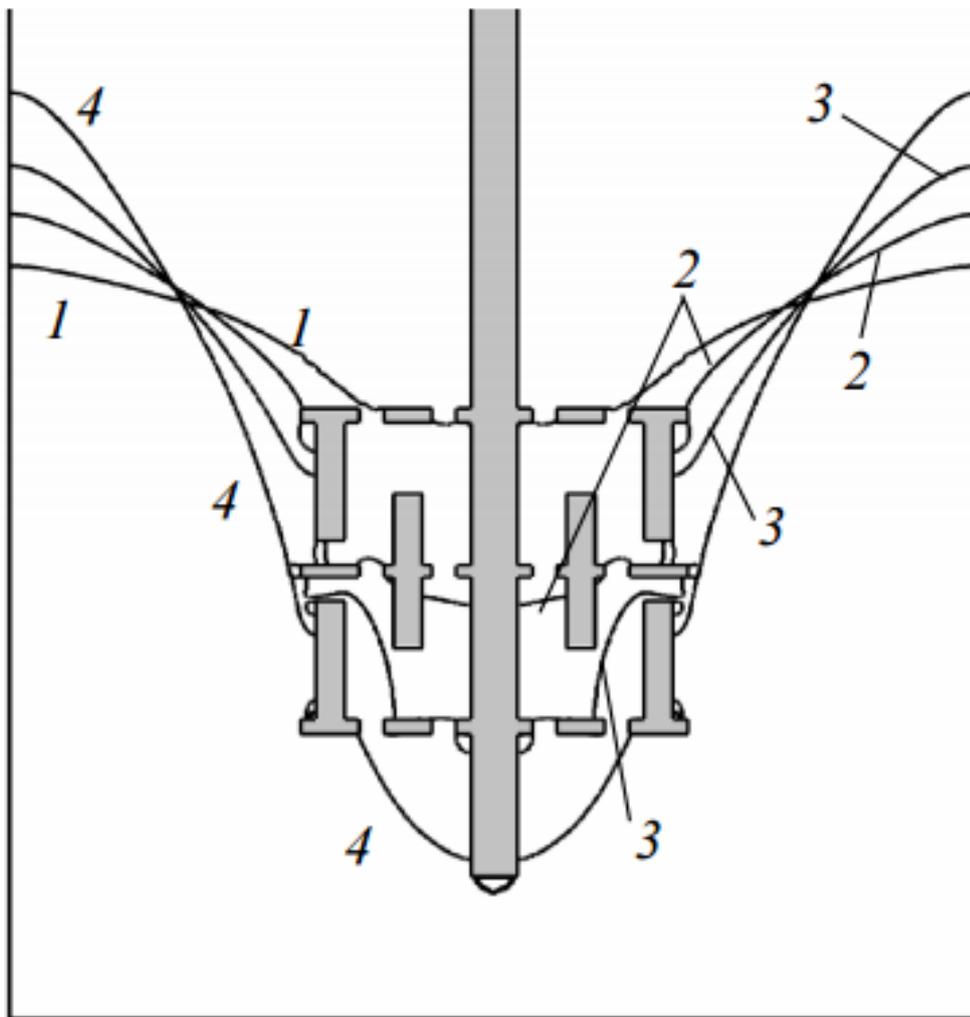


Рис. 2.3 Положение уровня жидкости металла
(1 – $n = 500$, 2- 1000 , 3 – 1500 , 4 – $n=3000$ об/мин)

Зависимость момента сил от скорости вращения завихрителя приведена на рисунке 2.4, при изменении скорости вращения от 100 об/мин до 1500 об/мин течение расплавленного металла носит установившейся характер. Силы поверхностного натяжения не оказали существенного влияния на значения момента сил. Также можем наблюдать, что минимальное значение момента сил слабо отличается от максимального значения при заданной скорости вращения завихрителя, но при скоростях выше 1500 об/мин течение становится нестационарным.

При дальнейшем исследовании наблюдаем картину течения жидкого металла при различных скоростях вращения завихрителя (рис. 2.5).

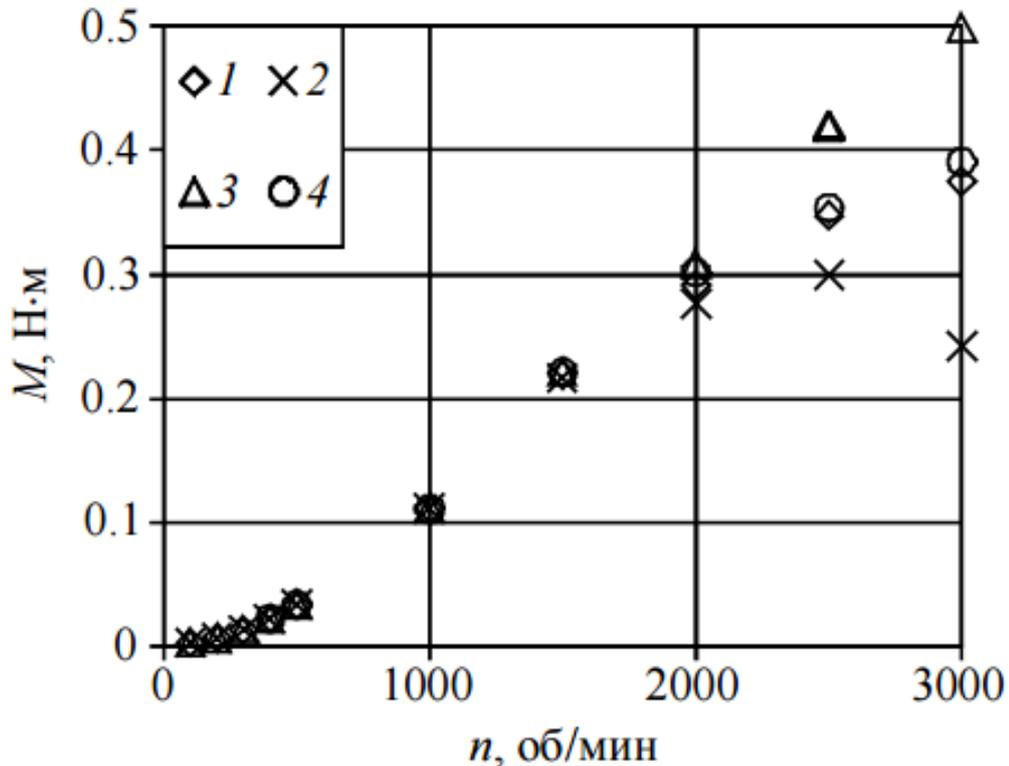


Рис. 2.4 Зависимость момента сил от числа оборотов завихрителя (1-без учета сил поверхностного натяжения; 2 – нижняя граница; 3 – верхняя граница; 4 –с учетом сил поверхностного натяжения)

При скорости вращения 500 об/мин расплавленный металл полностью покрывает завихритель, и в окрестностях штифтов образуются шесть маленьких вихрей, а вблизи боковой стенки – один крупный (рис. 2.5 а). На рис. 2.5 б при скорости вращения 1000 об/мин жидкий металл наполовину покрывает завихритель, вблизи штифтов образуется четыре мелких вихрей и в окрестности боковой стенки вихрь распадается на два. При увеличении скорости перемешивающего устройства наблюдается уменьшение поверхности соприкосновения жидкого металла с завихрителем и формирование двух относительно крупных вихрей (рис. 2.5 с-f). На рис. 2.6 оценивается размер вихрей, вызванных турбулентными пульсациями,

изменяющийся от колмогоровского масштаба $\left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{0,25}$ до $\frac{k^{1,5}}{\varepsilon}$ [24]. Значение размеров вихрей не превосходит 1 см, также убывает с ростом скорости вращения завихрителя до 2000 об/мин. При скоростях сращения завихрителя от 2000 об/мин до 3000 об/мин размер вихрей остается постоянным и лежит в пределах 5-6 мм.

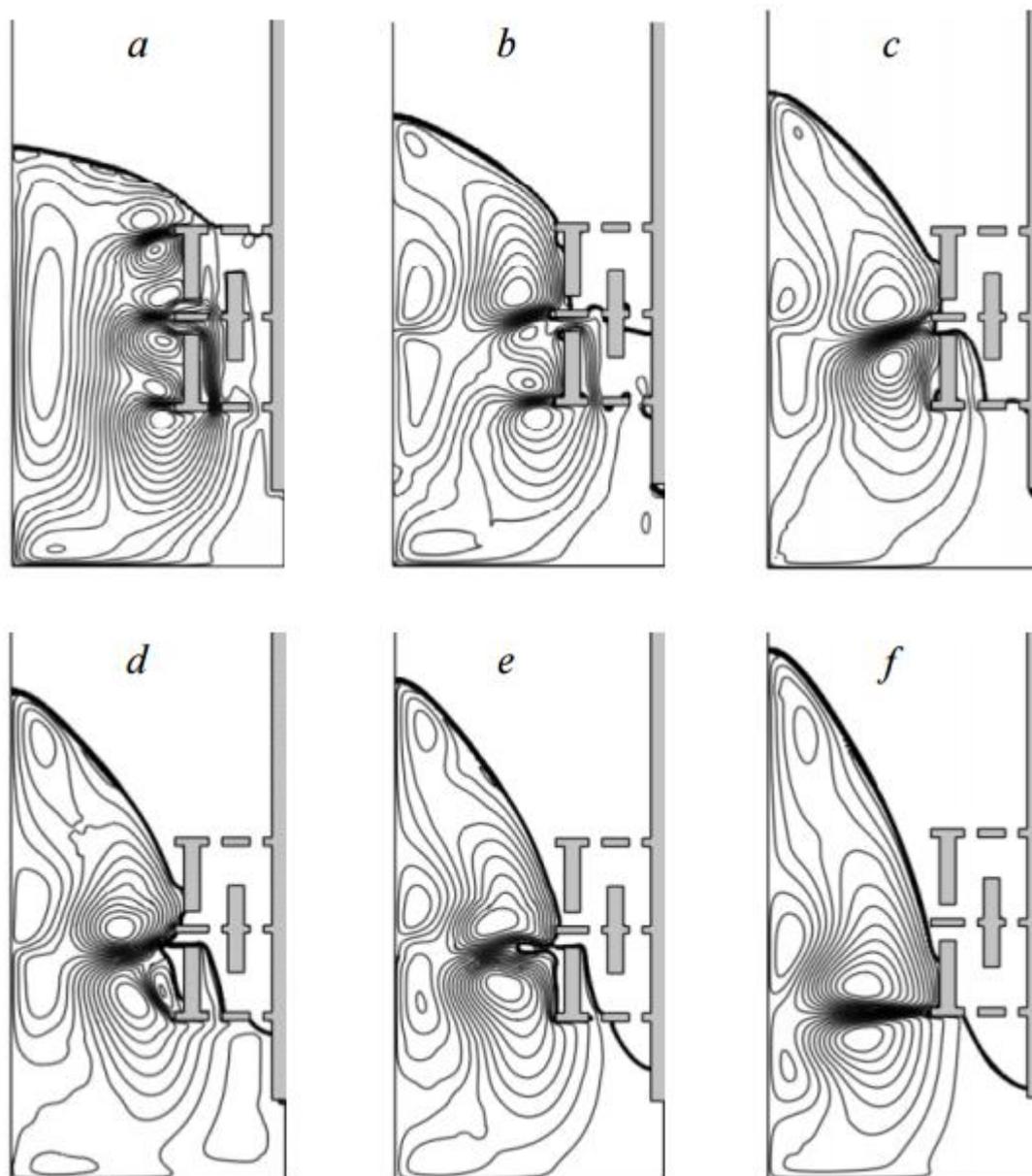


Рис. 2.5 Линии тока в жидком металле

(a – n = 500; b – 1000; c – 1500; d – 2000; e – 2500; f – 3000 об/мин)

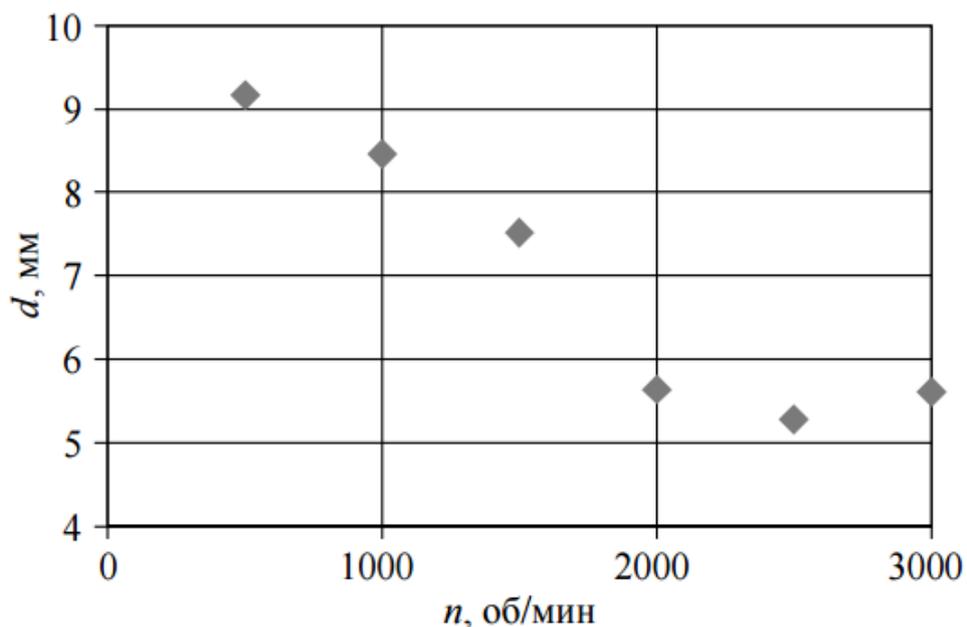


Рис. 2.6 Зависимость размера турбулентных вихрей от числа оборотов завихрителя

Результаты расчетов показывают рост момента сил M и рост турбулентной диффузии жидкого металла D_t при увеличении скорости вращения завихрителя. Как показано, на рис. 2.7 темп роста турбулентной диффузии снижается после 1500 *об/мин*, т.к. площадь поверхности соприкосновения жидкого металла и завихрителя уменьшается. С другой стороны, увеличение скорости перемешивающего устройства ведет к падению работы внешних сил по отношению к кинетической энергии вращающегося жидкого металла (рис. 2.8), которое описывается следующей зависимостью $Eu = 1.183 \exp(-4.298 \cdot 10^{-7} Re)$.

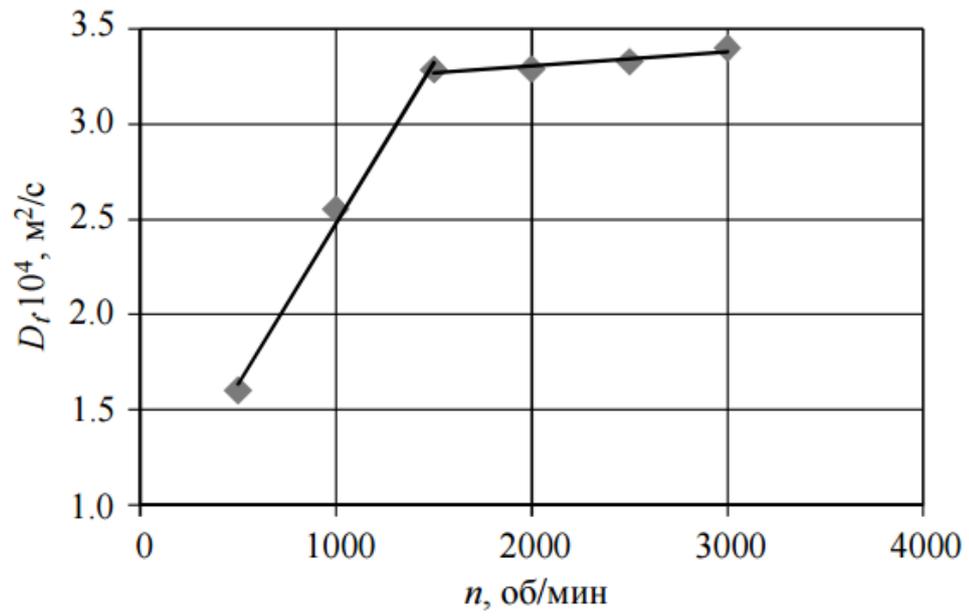


Рис. 2.7 Зависимость турбулентной диффузии от числа оборотов завихрителя

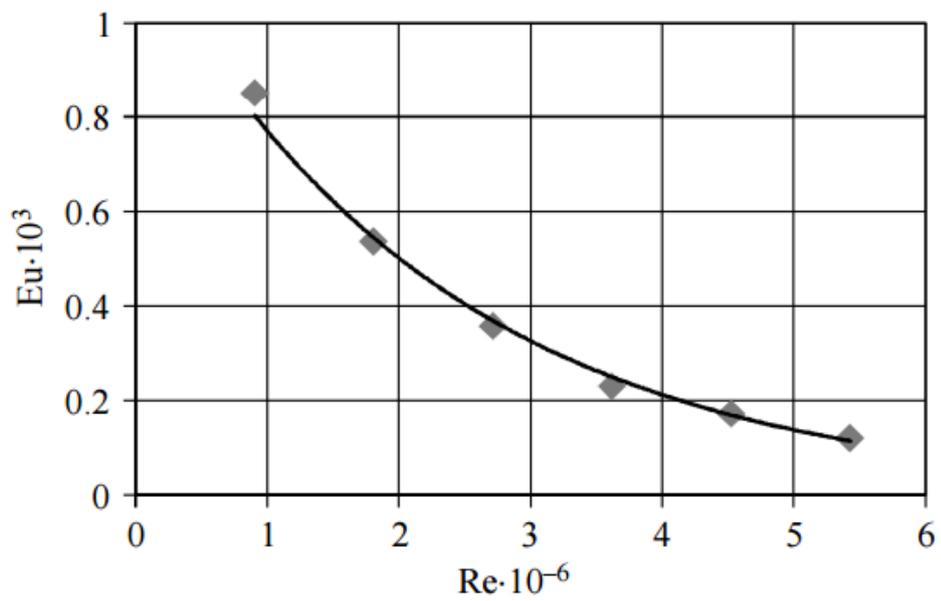


Рис. 2.8 Зависимость критерия мощности от числа Рейнольдса

3. Влияние кавитации на дисковый завихритель для перемешивания расплавленного алюминия и частиц модификатора

3.1 Описание проблемы

На рис. 3.1 б) показан завихритель после 5 минут работы в промышленном тигле емкостью 100 литров с расплавленным алюминием при температуре 750°C и частоте вращения 2500 об/мин. Как видно из рисунка, все рассекатели отсутствуют [25, 26]. Края дисков «съедены». Учитывая, что температура плавления титана, из которого выполнен завихритель, около 1670 °С, температурное воздействие расплавленного алюминия не может являться причиной разрушения завихрителя. К тому же, структура поверхности дискового завихрителя типична для поверхности, испытавшей кавитационное воздействие.



а)



б)

Рис. 3.1 Дисковый завихритель

а) До действия кавитации; б) После действия кавитации

Известно, что кавитация возникает при течении жидкости вокруг плохо обтекаемых тел, когда статическое давление в жидкости оказывается

меньшее парциального давления насыщенных паров и растворенных газов. За условия возникновения гидродинамической кавитации отвечает критерий кавитации, определяемый выражением [27, 28]: $\kappa = (P_1 - P_{\text{нп}}(T)) / (0.5\rho V^2)$, где ρ – плотность жидкого металла, V – скорость жидкого металла, P_1 – статическое давление; $P_{\text{нп}}$ – давление насыщенных паров металла при температуре T .

Гидродинамическая кавитация возникает в том случае, если значение критерия кавитации меньше единицы. Оценим критерий кавитации для рассматриваемого завихрителя.

Давление насыщенных паров на поверхности раздела фаз жидкость-пар подчиняется закону [29]:

$$P_{\text{нп}}(T) = P_1 \cdot \exp\left(\frac{L}{R_y} \left(\frac{1}{T_{\text{кип}}} - \frac{1}{T}\right)\right).$$

3.2 Влияние вращательного движения

Примем теплоту испарения алюминия $L = 2.943 \cdot 10^5 \text{ Дж/(моль)}$, температуру кипения алюминия при нормальных условиях $T_{\text{кип}} = 2723 \text{ К}$. Здесь универсальная газовая постоянная $R_y = 8.31 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{град)}$, атмосферное давление $P_1 = 101325 \text{ Па}$. Пусть температура расплавленного алюминия равна $750 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T = 1023 \text{ К}$), плотность жидкого алюминия – 2700 кг/м^3 , внешний радиус диска завихрителя $R = 0.04 \text{ м}$. При скорости оборотов мешалки в минуту – n , угловая скорость вращения равна $2\pi n/60$, а окружная скорость края диска равна $2\pi n R/60$. Тогда число оборотов, при котором возникает кавитация, определится неравенством:

$$n > n_{\text{кр}}(T, R) = \frac{60}{2\pi R} \sqrt{2 \frac{P_1 - P_{\text{нп}}(T)}{\rho}}.$$

На рис. 3.2 показана зависимость критического числа оборотов от температуры расплавленного алюминия. Область, лежащая выше кривой, это область возникновения кавитации, а ниже – отсутствие кавитации. Для радиуса диска 40 мм , скорость вращения выше 2100 об/мин приводит к кавитации при любых значениях температуры, а для радиуса диска 75 мм таковой является скорость вращения выше 1100 об/мин [24].

На рис. 3.3 показана зависимость критического числа оборотов от радиуса диска завихрителя. Область, лежащая выше кривой, соответствует области возникновения кавитации, а ниже – отсутствие кавитации. При изменении температуры алюминия от температуры плавления $660 \text{ }^\circ\text{C}$ до $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ положение кривой зависимости критического числа оборотов мешалки от радиуса диска изменяется слабо, а при больших температурах – $2200 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше смещение этой кривой становится заметным. Из графика видно, что для радиуса диска меньше 26 мм – 27 мм кавитация не будет иметь место при изменении температуры в диапазоне от $660 \text{ }^\circ\text{C}$ до $2000 \text{ }^\circ\text{C}$.

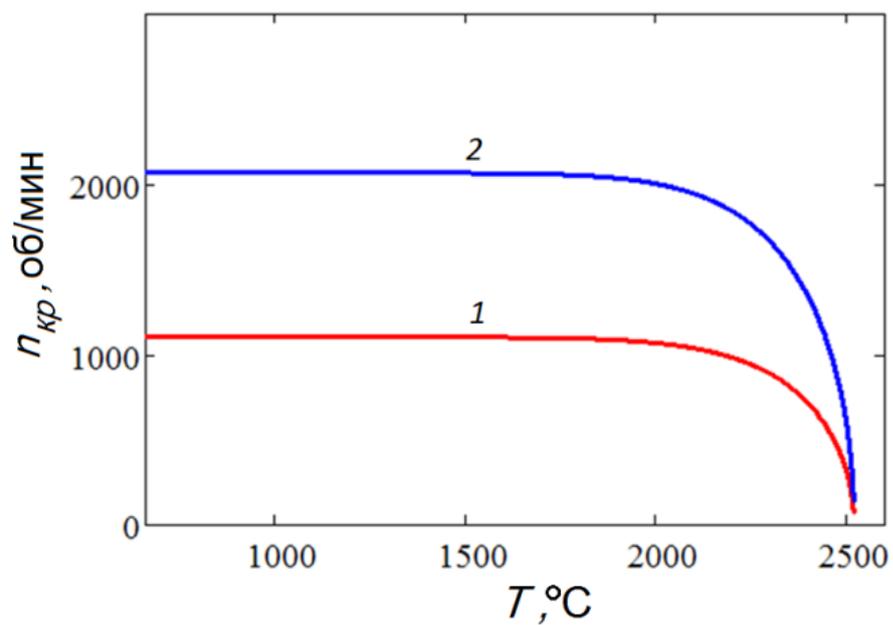


Рис. 3.2 Зависимость критического числа оборотов от температуры металла.

1 – $r = 0,075$ м, 2 – $r = 0,04$ м.

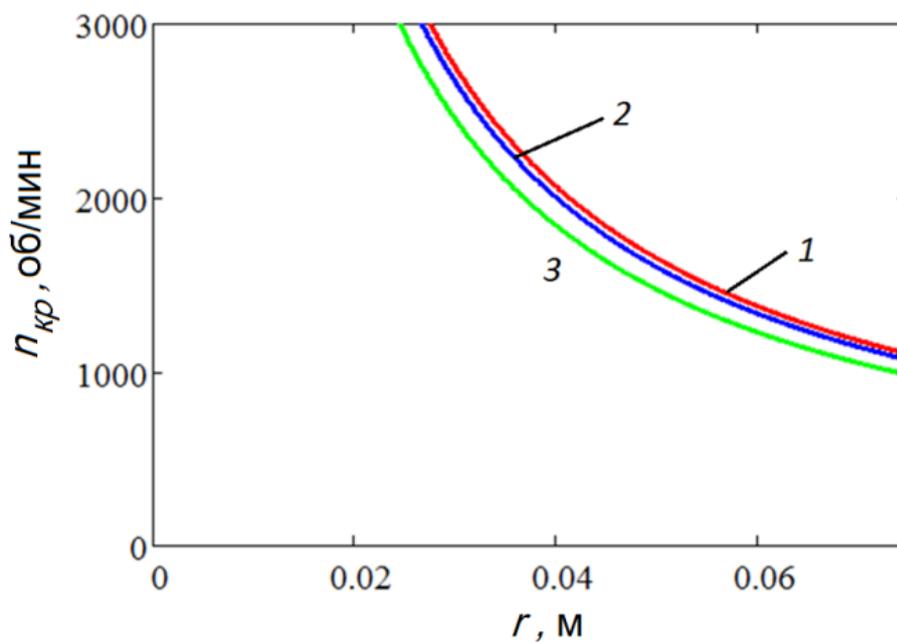


Рис. 3.3 Зависимость критического числа оборотов от радиуса диска.

1 – $T = 660$ °C, 2 – $T = 2000$ °C, 3 – $T = 2200$ °

3.3 Влияние вибрации

Для изучения условий возникновения явления кавитации можно проанализировать поток расплавленного металла в цилиндрическом тигле CABD (рис. 3.4) под действием перемешивающего устройства 2, гармонически осциллирующего вдоль направляющего стержня 1 по закону $x = A \cdot \cos(\omega t)$. Верхняя граница диска тигля открыта, а границы CA, AB и BD – твердые поверхности, которые непроницаемы для расплавленного металла.

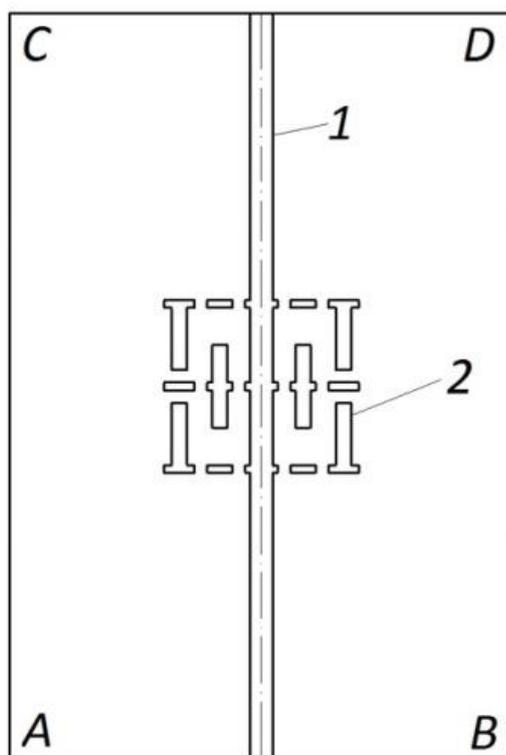


Рис. 3.4 Объект исследования

Предположения, используемые для описания математической модели, заключаются в следующем: расплавленный металл и пары металлов считаются несжимаемой жидкостью; поверхностное натяжение жидкого металла, которое заметно для радиусов пузырьков, значительно меньше 1 мкм, пренебрегают; поток турбулентный, осесимметричный; вибрация -

низкочастотная; не учитывается отставание по скорости пузырьков пара в расплавленном металле [25].

Система основных уравнений состоит из:

– уравнение сохранения массы для паров металла

$$\frac{\partial \alpha_v \rho_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{V}) = R_e - R_c \quad (3.1)$$

– уравнение сохранения массы для смеси расплавленного алюминия и его паров

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.2)$$

– изменения количества движения смеси

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_{eff} \quad (3.3)$$

– изменение турбулентной кинетической энергии

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{V}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_{turb}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3.4)$$

– изменение скорости диссипации турбулентной кинетической энергии

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{V}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_{turb}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (3.5)$$

$\rho = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l$ – плотность смеси; ρ_l – плотность жидкого металла; ρ_v – плотность паров металла; $\bar{\bar{\tau}}_{eff} = \bar{\bar{\tau}} + \bar{\bar{\tau}}_{turb}$ – эффективный тензор напряжений; $\bar{\bar{\tau}}_{turb} = \mu_{turb} (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{U}$ – тензор турбулентных напряжений; $\bar{\bar{\tau}} = \mu (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)$ – тензор вязких напряжений; $\mu = \mu_v \alpha_v + \mu_l (1 - \alpha_v)$ – динамическая вязкость смеси; $\mu_{turb} = \rho C_\mu k^2 \varepsilon^{-1}$ – турбулентная вязкость; $G_k = 2 \mu_{turb} \mathbf{S} : \mathbf{S}$ – производство турбулентной кинетической энергии вследствие сдвигового течения (действие градиентов

скорости); $\mathbf{S} = 0.5(\nabla\vec{V} + \nabla\vec{V}^T)$ – тензор деформаций.

Процесс массопереноса от паровой фазы к фазе расплавленного металла и обратно описывается в соответствии с Zwart - Gerber – Belamri моделью [29]:

$$R_e = f_{vap} \frac{2a_{nuc}(1-\alpha_v)\rho_v}{r_b} \left(\frac{2}{3} \frac{p_{SV} - p}{\rho_l} \right)^{-0.5}, \quad p < p_v$$

$$R_c = f_{cond} \frac{2a_{nuc}\alpha_v\rho_v}{r_b} \left(\frac{2}{3} \frac{p - p_{SV}}{\rho_l} \right)^{-0.5}, \quad p > p_v$$

p_v – давление насыщенных паров; $r_b = 10^{-6}$ м – радиус пузырьков, $\alpha_{nuc} = 5 \cdot 10^{-4}$ – объемная доля участка зародышеобразования; $f_{vap} = 50$ – коэффициент испарения; $f_{cond} = 0.01$ – коэффициент конденсации.

Расчеты в (3) - (4) проводились для следующих значений параметров: $C_{1\varepsilon} = 1.44$; $C_{2\varepsilon} = 1.92$; $C_\mu = 0.09$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

Условия непротекания устанавливаются на твердых поверхностях тигля и мешалки, статическое давление атмосферы устанавливается на открытой границе.

Решение математической модели реализуется с помощью Ansys-Fluent [19]. Метод конечных объемов [30] используется для решения системы уравнений (1) - (5). Основные уравнения (1) - (5) вычисляются по неявному методу, в котором поточная конечно-разностная схема является аппроксимацией первого порядка для аппроксимации конвективных членов уравнений. Поле давления вычисляется стандартным алгоритмом. Связь давления и скорости осуществляется с помощью метода SIMPLE [3]. Значения переменной турбулентности на твердых поверхностях определяются в соответствии с моделью SWF (стандартная функция стены). Для имитации движения вибратора используется подход Dynamicmesh с перестройкой сетки слоями (Layering). Временной шаг зависит от частоты

колебаний перемешивающего устройства и изменяется от $10^{-2}c$ до $10^{-6}c$.

Для численного моделирования перемешивания жидкого металла применялась конечноразностная сетка, которая была учащена вблизи поверхности перемешивающего устройства (рис. 3.5). Конечноразностная сетка состоит из 81848 четырехугольных ячеек.

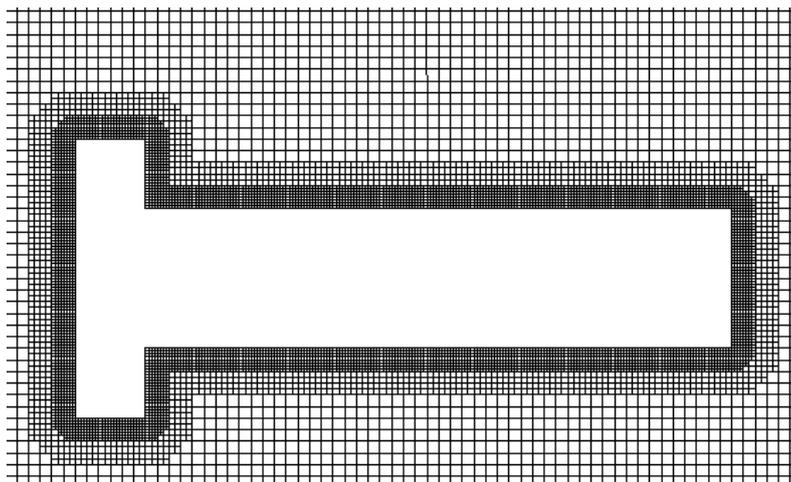


Рис. 3.5 Элемент разностной сетки

Расчеты проводились для следующих значений параметров:

- плотность расплавленного металла $\rho_l = 2700 \frac{кг}{м^3}$;
- плотность пара металла $\rho_v = 0.87 \frac{кг}{м^3}$;
- динамическая вязкость паров металла $\mu_v = 1.8 \cdot 10^{-5} Па \cdot c$;
- динамическая вязкость жидкого металла $\mu_l = 10^{-3} Па \cdot c$;
- высота тигля (СА) 0.3м;
- диаметр АВ 0.2м.

На рис. 3.6 показан график зависимости предельной амплитуды колебаний завихрителя от частоты колебаний $f = \frac{\omega}{2\pi}$. Если амплитуда

колебаний $A > A_{\text{lim}}(f)$ при частоте f , то возникает кавитационный режим в жидком металле, если $A < A_{\text{lim}}(f)$ кавитация не возникает.

Результаты расчетов, проведенные с помощью численного моделирования, показаны на рис. 3.6 и обозначены символами, которые снабжены кривой $A = 1371 \cdot f^{-\frac{4}{3}}$, полученной методом наименьших квадратов. Согласно теоретическим оценкам Игнатъева и др. [32] предельная амплитуда колебаний обратно пропорционально частоте колебаний в первой степени.

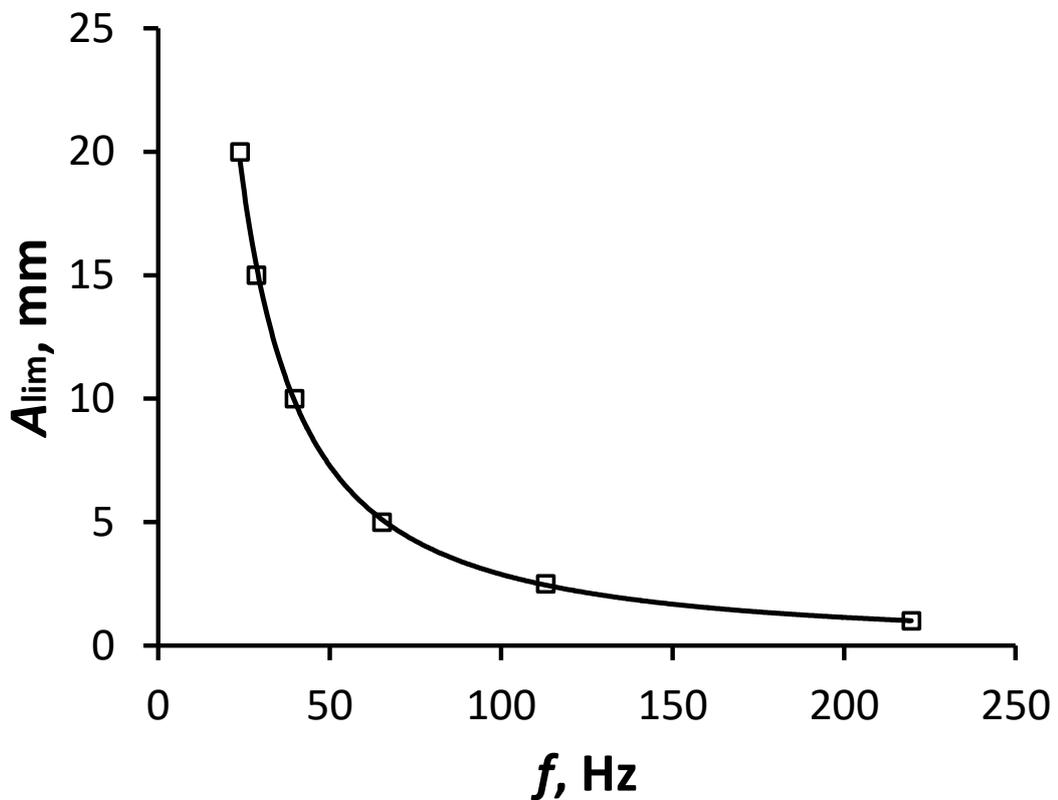


Рис. 3.6 Предельная зависимость амплитуды колебаний от частоты.

Причиной различия в результатах можно объяснить тем, что Игнатъев не учитывает динамическую вязкость жидкого металла при оценке времени заполнения полости, которая при расчетах играет большую роль.

Для наглядности на рис. 3.7 показаны образцы образования пузырьков металлического пара вблизи вибрационных элементов завихрителя, который

колеблется вдоль вертикальной оси с частотой 100Гц и амплитудой 7мм после первого периода колебаний в интервале времени $1 \leq \frac{t}{T} < 2$. Предельное значение амплитуды колебаний вибратора, при котором возникает кавитация в жидком металле, для частоты 100Гц составляет $\approx 3\text{мм}$.

При движении вибратора вверх (рис. 3.7 б-д) образуются пузырьки металлического пара, растущие со временем. На рисунке 3.7 е пузырьки,

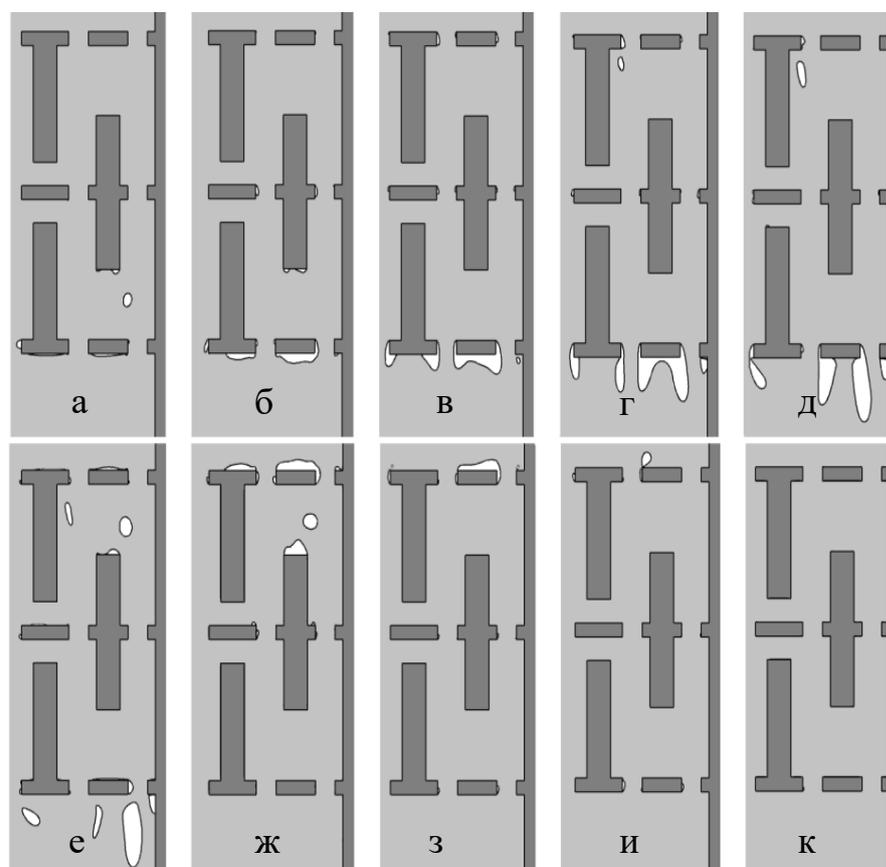


Рис. 3.7 Пузырькообразование паров металла.

а) – $t/T=1.0$, б) – 1.1, в) – 1.2, г) – 1.3, д) – 1.4, е) – 1.5, ж) – 1.6,
з) – 1.7, и) – 1.8, к) – 1.9.

светло-серый – жидкий металл, темно-серый – структурный элемент перемешивающего устройства, белый – паров металла.

которые образовались на периферии отверстий нижнего диска, вырываются из диска в максимальном положении вибратора. Размеры пузырьков на

нижнем диске вибратора сопоставимы с размерами поперечного сечения вибрационных элементов. Можно увидеть, что на элементах среднего и верхнего дисков образуются пузырьки пара, которые намного меньше элементов вибратора. Прежде чем, завихритель займет максимальное положение, пузырьки металлического выходят из диска (рис. 3.7 в-е). Во время движения вибратора вниз пузырьки в основном образуются на элементах верхнего диска, также небольшие пузырьки можно наблюдать на элементах нижнем и среднем дисках [31].

3.4 Условие возникновения кавитации на основе анализа теории подобия

Для возникновения кавитации в жидкости необходимо, чтобы время заполнения пустоты, образовавшейся жидкости было больше характерного времени образования этой пустоты [32]. Если за характерное время образования пустоты принять время, за которое завихритель проходит расстояние от крайнего нижнего положения, до крайнего верхнего положения (полупериод колебаний), то это время будет связано с частотой колебания завихрителя соотношением, $t_f = \frac{1}{2f}$.

Очевидно, что время заполнения пустоты зависит от перепада давления между жидкостью и насыщенными парами в полости, от плотности жидкости, от вязкости жидкости и от амплитуды колебания завихрителя, поэтому предельную частоту колебания завихрителя можно представить в виде [33]:

$$t = (\Delta p)^{x_1} (\rho)^{x_2} (\mu)^{x_3} (A)^{x_4}.$$

Из соображений размерности следует, что $t = (\Delta p)^{x_2-1} (\rho)^{x_2} (\mu)^{1-2x_2} (A)^{2x_2}$. Значение неизвестной переменной x_2 можно найти из численного эксперимента по определению предельной амплитуды колебания, согласно которому амплитуда обратно пропорциональна частоте колебания в степени четыре третьих, рис. 3.6. Откуда следует, что $x_2 = \frac{3}{8}$. Тогда,

$$t = (\Delta p)^{-\frac{5}{8}} (\rho)^{\frac{3}{8}} (\mu)^{\frac{1}{4}} (A)^{\frac{3}{4}}.$$

Согласно теореме, время заполнения пустоты будет зависеть от двух безразмерных комплексов: числа Струхала, $Str = \frac{t}{A} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$ и число Рейнольдса,

$$Re = \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \frac{A}{\nu}.$$

Соотношение, описывающее границу возникновения кавитации в устройстве, имеет вид:

$$Str = \beta Re^\alpha.$$

Из результатов расчета, рис. 3.6, следует, что $\alpha = -\frac{1}{4}$; $\beta \approx 0,866$. При выполнении условия $Str > 0,866 Re^{(-\frac{1}{4})}$ возникает кавитационный режим при вертикальном вибрировании завихрителя.

4. Численное моделирование возникновения кавитации при сложном движении перемешивающего устройства

Сложное движение перемешивающего устройств рассматриваем как сумму нескольких движений, состоящее из поступательного движения и движения вокруг оси. Расчеты проводились для системы уравнений (3.1-3.5) при сложном движении перемешивающего устройства, где

$$n = 500 \div 2000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

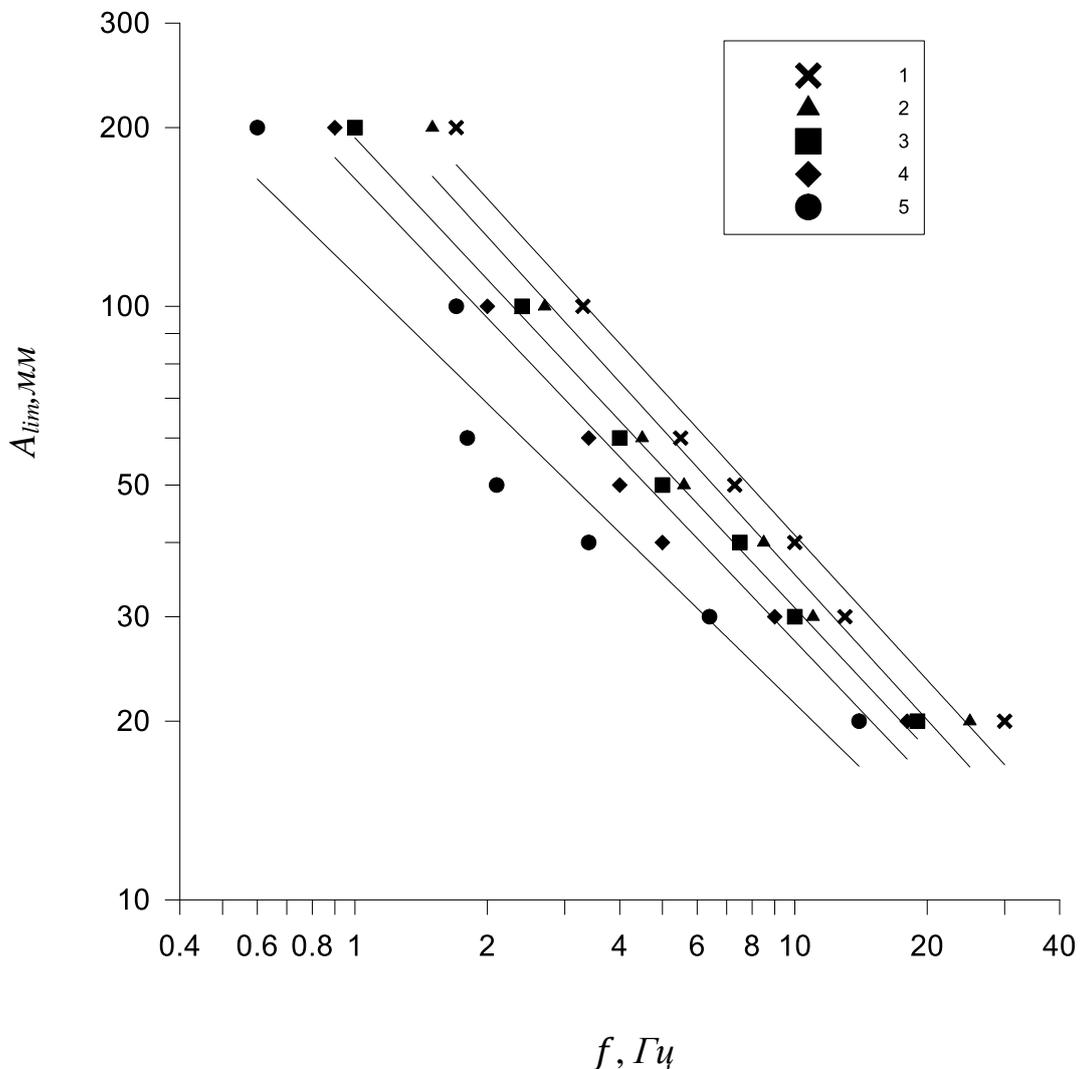


Рис. 4.1 Предельная зависимость амплитуды колебаний от частоты.

1 – $n = 500$ об/мин; 2 – 1000 об/мин; 3 – 1200 об/мин; 4 – 1500 об/мин;

5 – 1700 об/мин.

На рис. 4.1. показана зависимость предельной амплитуды от продольной частоты колебания завихрителя с учетом вращения перемешивающего устройства в логарифмической системе координат. Область, которая лежит выше кривых, это область возникновения кавитации, ниже – это область отсутствия кавитации. Также, численное моделирование показало, что при скорости вращения перемешивающего устройства равной 2000 об/мин кавитация будет возникать уже при амплитуде 1мм для

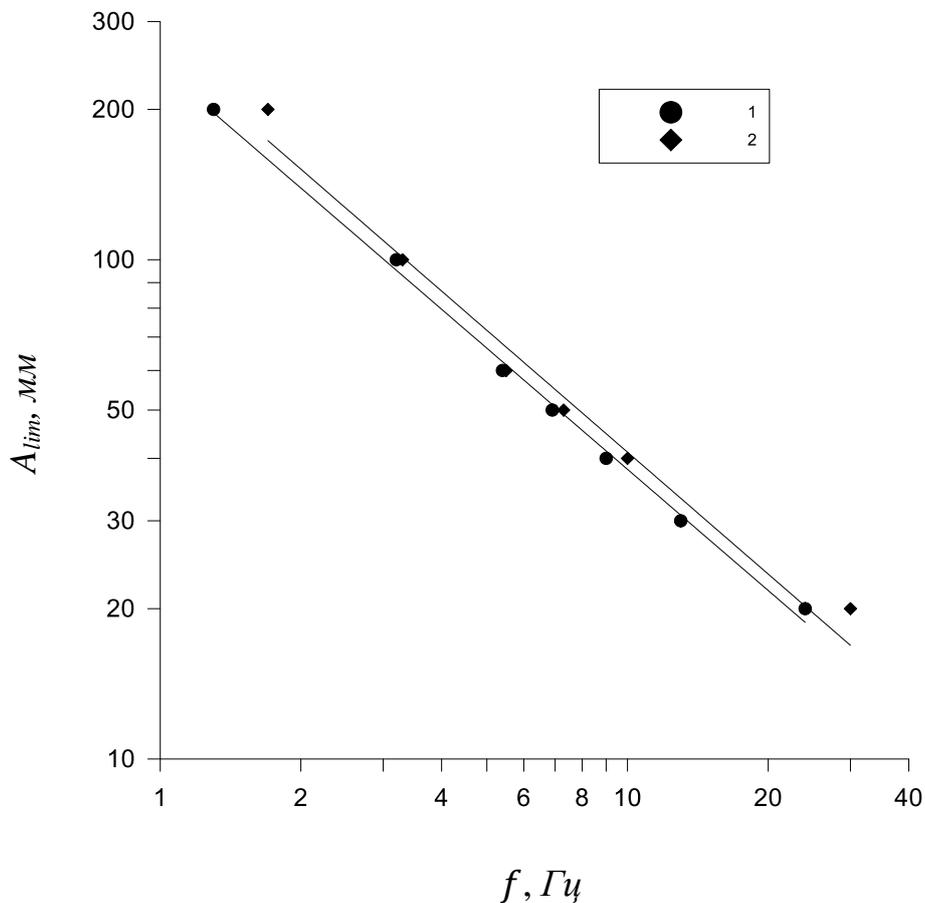


Рис. 4.2 Предельная зависимость амплитуды колебаний от частоты.

1 – без вращения; 2 – $n=500$ об/мин.

диапазона частот в пределах 20-200 Гц. Аппроксимация предельной амплитуды в зависимости от частоты колебания завихрителя для разной скорости его вращения по методу наименьших квадратов степенной функцией дает следующее соотношение:

$$A_{lim} = C(n)f^{\alpha(n)},$$

$$C(n) = 0.00006573n - 0.85905; \alpha(n) = -0.1237n + 1.33.$$

На рис. 4.2 изображен график зависимости $A_{lim}(f)$ при скорости вращения 500 об/мин, который мало отличается от графика зависимости $A_{lim}(f)$ без учета вращения перемешивающего устройства. Из рис. 4.3 показано, что при увеличении скорости вращения перемешивающего устройства при 20 Гц предельная амплитуда уменьшается.

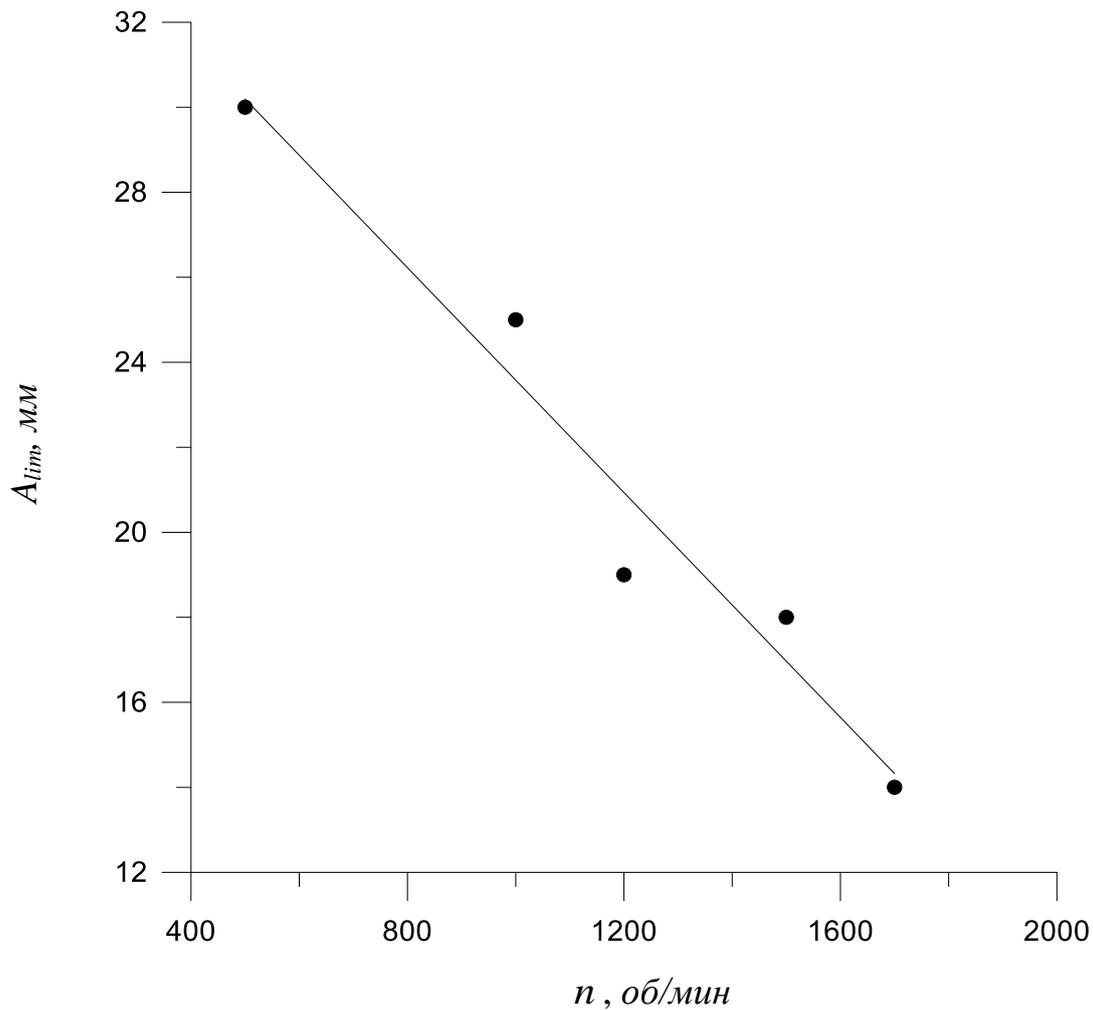


Рис. 4.3 Зависимость предельной амплитуды от числа оборотов мешалки при частоте 20 Гц.

Заключение

- 1) Проведено численное моделирование движения расплавленного металла в тигле под действием вращающегося завихрителя. Показано, что турбулентная диффузия жидкого металла линейно увеличивается с ростом скорости вращения завихрителя до 1500 об/мин. Дальнейшее увеличение скорости вращения практически не влияет на величину турбулентной диффузии.
- 2) Оценка числа кавитации показывает, что для радиуса диска завихрителя более 40 мм и скорости вращения выше 2100 об/мин гидродинамическая кавитация будет иметь место при любом значении температуры расплавленного металла.
- 3) Критическое число оборотов мешалки остается постоянным, когда температура расплавленного металла повышается до 70% от температуры кипения, после чего наблюдается резкое падение этого значения.
- 4) В соответствии с закономерностями формирования и развития кавитационных пузырьков, полученных из численного моделирования, следует ожидать наибольшего кавитационного воздействия на поверхность вибратора на краях верхнего и нижнего дисков.
- 5) Предельная амплитуда осевого колебания завихрителя, при которой происходит кавитация, обратно пропорциональна частоте колебаний в степени четыре трети.
- 6) Методом анализа размерностей получена зависимость числа Струхаля от числа Рейнольдса, при котором будет возникать кавитация при вибрировании завихрителя: $Str > 0.866 Re^{(\frac{1}{4})}$.
- 7) Предельная амплитуда осевого колебания завихрителя, при которой возникает кавитация, зависит от частоты колебания и числа оборотов вращения по закону:

$$A_{\text{im}} = C(n) f^{\alpha(n)},$$

$$C(n) = 0.00006573n - 0.85905; \alpha(n) = -0.1237n + 1.33.$$

Данная работа может имеет дальнейшее продолжение с точки подтверждения численного моделирования сложного движения экспериментом.

Список литературы:

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии // Изд. "Химия" М. - 1971г. - 784 с.
2. Дорофеев Ю.Г. Динамическое горячее прессование в металлокерамике// Изд. Metallurgy. - 1972г. 35 с.
3. Глушко В.П. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания// Изд. "Книга по требованию". - 1971г. - 28 с.
4. Лебедев В.Л., Добровольский А.Д. Конвективное перемешивание в море// Изд. Московского университета.- 1977г. - 9 с.
5. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета// Изд. "Химия" - 1984 г. - 336с.
6. Chhalabra R.P., Richardson J.F., Non-Newtonian Flow and Applied Rheology. Engineering Applications// Oxford:Elsevier. - 2008 - 518 p.
7. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками // Изд. «Химия». - 1975г. - 384с.
8. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости// М.: Энергоатомиздат. - 1984. - 152 с.
9. Кафаров В.В. Основы массопередачи// Изд. Москва: Высшая школа. – 1962г. – 655 с.
10. Лисовская Д.П. Производственные технологии// Изд. "Вышэйшая школа", - 2009г. - 20 с.
11. Акулич П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок// Изд. "Белорусская наука". - 2010г. - 354 с.
12. Жуков В.И. Процессы и аппараты пищевых производств// Изд. НГТУ. - 2013г. - 44 с.
13. Муравьев И.А. Технология лекарств// Изд. «Медицина». – 1980г. – 83 с.
14. Справочник химика: Том V// Изд. "Химия". - 1968г. - 525 с.
15. Батурич О.В. Построение расчетных моделей в препроцессоре GAMBIT универсального программного комплекса FLUENT/ О.В. Батурич Н.В, Батурич, В.Н. Матвеев.САМАРА, Изд. СГАУ, 2009 г. с 172 40
16. Батурич О.В. Расчет течений жидкости и газа с помощью универсального программного комплекса Fluent / О.В. Батурич, Н.В.Батурич, В.Н. Матвеев, САМАРА, Изд.СГАУ, 2009 г. с 151

17. Заявка на патент № 2016130836 РФ. Устройство для смешения жидкостей и порошков с жидкостью / Ворожцов А.Б., Архипов В.А., Шрагер Э.Р., Даммер В.Х., Ворожцов С.А., Хмелева М.Г. Заявлено 26.07.2016.
18. Патент № 2625471 РФ, МПК В01F 7118, В01F 7126. Устройство для смешивания жидкости и порошков с жидкостью/ Ворожцов А.Б., Архипов В.А., Шрагер Э.Р., Даммер В.Х., Ворожцов С.А., Хмелева М.Г.; опубл. 14.07.2017.
19. Хмелева М.Г., Даммер В.Х., Тохметова А.Б., Миньков Л.Л. Численное исследование вихреобразования в жидком металле под действием дискового завихрителя // Вестник Томского Государственного Университета: Математика и механика. - 2017. - №46. - С. 76-85.
20. ANSYS FLUENT Tutorial Guide: Release 14.0. 2011. ANSYS Inc.
21. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Вычислительные технологии в задачах механики жидкости и газа// Изд. ФИЗМАТЛИТ. - 2012г. - 40 с.
22. Ахметов В.К., Волшаник В.В., Зуйков А.Л., Орехов Г.В. Моделирование и расчет контрвихревых течений// Изд. ФГБОУ ВПО "МГСУ". - 2012г. - 119 с.
23. Fluent 6.3 User's Guide. - 2006. - Fluent Inc.
24. Youngs D.L. Time-dependent multi material flow with large fluid distortion // Morton K.W., Baines M.J. (eds.). Numerical Modeling for Fluid Dynamics. New York: Academic Press, 1982. P. 273–285.
25. Гарбачук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие// Изд. Политехнического университета. - 2012г. - 88 с.
26. Хмелева М.Г., Тохметова А.Б. Влияние кавитации на дисковый завихритель для перемешивания расплавленного алюминия и частиц модификатора // Сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Перспективы развития фундаментальных наук". - Томск: Томский политехнический университет, 2017. - С. 387-389.
27. Даммер В.Х., Тохметова А.Б., Хмелева М.Г., Миньков Л.Л. Влияние кавитации на дисковый завихритель для перемешивания расплавленного алюминия и частиц модификатора// Новосибирск. – 2017. – 49с.
28. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. – М.: Новые технологии, 2004. – 784 с.
29. Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 688 с.

30. Игнатъев А.Е., Долматов А.В., Игратьева Е.В., Истомина С.А., Пастухов Е.А. Русская металлургия//2012.- 97с.
31. Shiquan Zhou, Aragona Patty and Shiming Chen Advances in energy science and equipment engineering II// Taylor & Francis Group. - 2017. - 126 p.
32. Волков К.Н. Применение метода контрольного объема для решения задач механики жидкости и газа на неструктурированных сетках// БГТИ "Военмех". - 2005 г.
33. Справочник химика/ под.ред. Б.П. Никольского. – М.-Л. Химия, 1982. – С. 682–693.
34. Архипов В. А., Коноваленко А. И. Практикум по теории подобия и анализу размерностей. – Томск, 2016.

Отчет о проверке на заимствования №1

Автор: ai2050294@mail.ru / ID: 2058822

Проверяющий: ai2050294@mail.ru / ID: 2058822

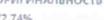
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» <http://www.antiplagiat.ru>

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 25
Начало загрузки: 06.06.2018 06:48:12
Длительность загрузки: 00:00:01
Имя исходного файла: Диплом магистра
Размер текста: 1544 kb
Символов в тексте: 51201
Слов в тексте: 5998
Число предложений: 513

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Последний готовый отчет (ред.)
Начало проверки: 06.06.2018 06:48:14
Длительность проверки: 00:00:01
Комментарий: не указано
Модуль поиска:

ЗАИМСТВОВАНИЯ 27,26%  ЦИТИРОВАНИЯ 0%  ОРИГИНАЛЬНОСТЬ 72,74% 



Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформление по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.
Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.
Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводилась проверка.
Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которому шла проверка, по отношению к общему объему документа.
Заимствования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.
Обобщаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом: определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Доля в тексте	Источник	Ссылка	Актуален на	Модуль поиска	Блоков в отчете	Блоков в тексте
[01]	0,2%	13,16%	Скачать полнотекстовую версию	http://journals.tsu.ru	31 Июля 2017	Модуль поиска Интернет	2	109
[02]	13,12%	13,12%	Numerical investigation of the vortex formation in a liquid ...	http://journals.tsu.ru	31 Июля 2017	Модуль поиска Интернет	106	108
[03]	4,14%	4,37%	Скачать	http://ip.rnsc.ru	14 Яна 2018	Модуль поиска Интернет	23	26

Руководитель ООП

доктор физ. - мат. наук, профессор

Руководитель ВКР

доктор физ. - мат. наук, профессор

Автор работы

студентка группы 10608

 А. Ю. Крайнов

 Л. Л. Миньков

 А. Б. Тохметова

« 06 » июня 2018 г.