

Исследование механизмов центробежного распыления на основе модельного эксперимента

*Жуков Евгений Юрьевич**, инженер кафедры 1101

«Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов»

Наурзалинов Алибек Серпаевич, техник кафедры 1101

«Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов»

Пашков Игорь Николаевич¹, доктор технических наук, профессор кафедры 1101

«Технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов»

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва (Россия)

*E-mail: ZhukovEY@mai.ru,
jezzacome@gmail.com

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2511-2845>

Поступила в редакцию 15.02.2024

Пересмотрена 16.04.2024

Принята к публикации 28.10.2024

Аннотация: Процесс диспергирования расплава на вращающейся чаше является распространенным методом получения металлических порошков. Изучение процесса диспергирования на реальных расплавах, в том числе методами визуализации, затруднено. Поэтому влияние таких факторов, как высота падения струи, величина потока жидкости, смачивание поверхности, наличие стенки у чаши, на процесс получения мелких капель предложено изучить с помощью модельной жидкости без кристаллизации, фиксируя процесс путем высокоскоростной съемки. Цель работы – определение наиболее благоприятных условий диспергирования, когда вся подаваемая жидкость превращается в капли без образования крупных капель, дополнительных струй, приводящих к вторичному распылению. В качестве модельной жидкости выбран раствор глицерина в воде с вязкостью, равной вязкости расплава олова. Процесс диспергирования снимался на высокоскоростную камеру с частотой съемки 1200 кадров/с. Установлено, что при увеличении потока расплава наблюдается изменение режима распыления. При росте давления увеличивается поток и кинетическое взаимодействие струи с поверхностью чаши, а следовательно, избыток жидкости, который распыляется преждевременно. При любом потоке подаваемой жидкости, если жидкость не попадает в центр, происходит вторичное распыление за счет разрушения пленки на гидравлическом скачке из-за неравномерной радиальной скорости на пике скачка. При изменении высоты подачи от 100 до 150 мм наблюдается вторичное распыление в виде капель в месте гидравлического скачка. Количество спиралей и вторичное распыление влияют на увеличение размера фракции частиц. В диапазоне высоты падения струи от 50 до 100 мм отмечается оптимальный процесс, при котором можно получить наименьшую фракцию. В эксперименте наблюдалась тенденция к улучшению процесса распыления при повышении чистоты обработки поверхности чаши. За счет стенок чаши увеличивается путь жидкости до выхода ее с чаши, разрушаются в пленку капли, летящие над поверхностью чаши, вследствие чего улучшается процесс диспергирования.

Ключевые слова: центробежное распыление расплава; диспергирование расплава на вращающейся чаше; поток жидкости; металлический порошок; гидродинамические условия; высокоскоростная съемка.

Для цитирования: Жуков Е.Ю., Наурзалинов А.С., Пашков И.Н. Исследование механизмов центробежного распыления на основе модельного эксперимента // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 4. С. 39–49. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-4-70-4.

ВВЕДЕНИЕ

Центробежное распыление расплава (ЦРР) является одним из распространенных методов получения металлических порошков с помощью диспергирования расплава. По сравнению с распылением расплава газом или водой ЦРР отличается более узким интервалом размеров получаемых частиц, что дает этому методу большие преимущества с точки зрения выхода годного продукта. Сущность метода заключается в разрушении расплава под действием центробежных сил на вращающейся чаше. При этом расплав на чашу может подаваться в форме струи, пленок и капель [1]. В любом случае на поверхности чаши формируется пленка жид-

кости, которая превращается в капли на кромке вращающейся чаши. Метод ЦРР ограничен получением материалов с невысокой температурой плавления. В основном это связано с необходимостью обеспечения смачивания расплавом поверхности чаши и ее стойкости к воздействию расплава. Для высокотемпературных сплавов обычно применяют центробежное распыление вращающегося прутка.

На процесс получения металлических частиц заданного размера влияют гидродинамические условия процесса диспергирования жидкости и тепловые условия, связанные с охлаждением и затвердеванием расплава. Для получения заданного размера частиц порошка

необходимо в первую очередь обеспечить подачу струи жидкости к чаше, ее распространение по поверхности и диспергирование на частицы определенного размера. Одновременное решение задач исследования гидродинамических и тепловых процессов громоздко и затруднительно, поэтому имеет смысл их раздельное изучение.

Анализ литературных источников по ЦРП показывает, что основное внимание уделяется проблемам влияния характера потока жидкости, конструкции диска и параметров распыления на фракционный состав получаемого порошка. Отмечается, что скорость вращения чаши в основном определяет размер получаемого порошка. Для получения порошков высокой дисперсности необходимо выбирать электродвигатель с частотой оборотов от 10000 об/мин [2; 3].

Одним из наиболее важных параметров при распылении является достижение определенного потока жидкости [4; 5]. В процессе центробежного распыления расплавленный металл смачивает диск и течет к периферии диска, где образует жидкий тор. Нестабильность, вызванная вращением диска, создает небольшие связи на краях диска, которые затем отбрасываются от диска в виде капель. При большой подаче жидкости связи могут не образовываться, и будет происходить режим распада пленки [6–8]. При низкой подаче жидкости капли могут образовываться непосредственно на краю или перед краем диска из-за неполного смачивания диска [9–11]. В работе [12] описывается процесс распыления при изменении потока от 3 до 10 кг/ч, по мере увеличения потока наблюдаются три механизма распыления жидкости на краю чаши: капельный, струйками и пленкой.

При высокой скорости вращения на чаше часто возникает так называемый гидравлический скачок [13–15]. Гидравлический скачок представляет собой кольцевой скачок течения, проявляющийся в резком увеличении толщины расплава и, соответственно, уменьшении радиальной скорости, а также в отрыве частиц жидкости до достижения края чаши [13–15].

В работах [16; 17] показано, что существует некое оптимальное расстояние от источника жидкости до чаши, при котором получается порошок наименьшей фракции. При отклонении от этого расстояния размер порошка увеличивается или происходит расширение интервала фракционного состава частиц.

Во многих источниках отмечается, что необходимо обеспечить хорошую смачиваемость поверхности чаши расплавом металла [18; 19]. Для достижения этого предлагается даже использовать чашу с покрытием, состав которого аналогичен составу распыляемого материала. В этом случае удавалось добиться хорошего смачивания [19]. Для максимального смачивания расплавом поверхности чаши при распылении можно предварительно чашу облудить распыляемым материалом. На адгезию расплава влияет чистота обработки поверхности чаши. Наблюдается тенденция к улучшению процесса распыления с повышением чистоты обработки поверхности чаши. В реальных процессах диспергирования металлов на шероховатой поверхности, как показано в [20], происходит налипание металла на поверхность чаши и образование застывшего металла в виде тора. На обработанной поверхности пленка жидкости будет более равномерно распределяться по чаше.

В работе [21] описано влияние угла борта чаши на размер получаемых частиц. Чем выше этот угол, тем более мелкие порошки можно получить. Самый мелкий порошок был получен при угле наклона 60–70°. Экспериментальные данные по поводу угла наклона чаши 90° отсутствуют [21]. В [10] также показано уменьшение фракции порошка с чашей с бортами. За счет стенок увеличивается путь жидкости до ее выхода с чаши, и в результате этого ближе к краю чаши уменьшается пленка.

Таким образом, существующие экспериментальные данные или расчетные модели рассматривают влияние различных факторов процесса диспергирования только на размер получаемой продукции, условия поддержания стабильности самого процесса не учитываются. Отмечается важная роль гидродинамических процессов, однако не приводятся описания поведения струи жидкости при попадании на вращающуюся чашу, превращения ее в пленку с последующим разрушением в капли. Не рассматривается также явление вторичного диспергирования крупных капель и фрагментов жидкости, которые имеют другую скорость по сравнению с пленкой на чаше. Поэтому представляет интерес визуализация процесса диспергирования модельной жидкости без учета процессов затвердевания с помощью высокоскоростной съемки.

Цель работы – определение наиболее благоприятных условий диспергирования, когда вся подаваемая жидкость превращается в капли без образования крупных капель, дополнительных струй, приводящих к вторичному распылению.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты по диспергированию на вращающейся чаше проводили с модельной жидкостью. В качестве модельной жидкости был выбран раствор глицерина в воде в соотношении 60/40, вязкость которого соответствовала вязкости расплавленного олова. Эксперимент не учитывал переохлаждение и затвердевание расплавов в реальных процессах. Изучалась только гидродинамика поведения жидкости. Весь процесс проходил на воздухе.

Для проведения эксперимента была создана специальная установка, состоящая из высокоскоростного привода вращения, чаши, устройства подачи жидкости. Привод вращения был жестко закреплен на массивном корпусе. Распылительная чаша имела диаметр 36 мм. На поверхность чаши подавалась жидкость через шприц объемом 50 мл. Скорость подачи жидкости изменялась с помощью давления в шприце, равного 1, 2 и 4 атм., а также диаметра иглы 0,8 и 1,5 мм. Схема установки представлена на рис. 1.

Частота вращения чаши была выбрана постоянной, равной 10 000 об/мин. Высота подачи жидкости варьировалась от 20 до 150 мм. Угол наклона бортов чаши составлял 0° и 90°.

Эксперименты проводились в условиях полного смачивания жидкостью поверхности чаши. Для получения режима несмачивания на распылительную чашу наносили синтетический каучук.

В эксперименте рассматривались три типа чаши: гладкая (проводилась полировка рабочей поверхности чаши абразивной бумагой с зернистостью 800), шероховатая (достигалась с помощью бумаги с зернистостью 40), а также без обработки (имеются следы от резца).

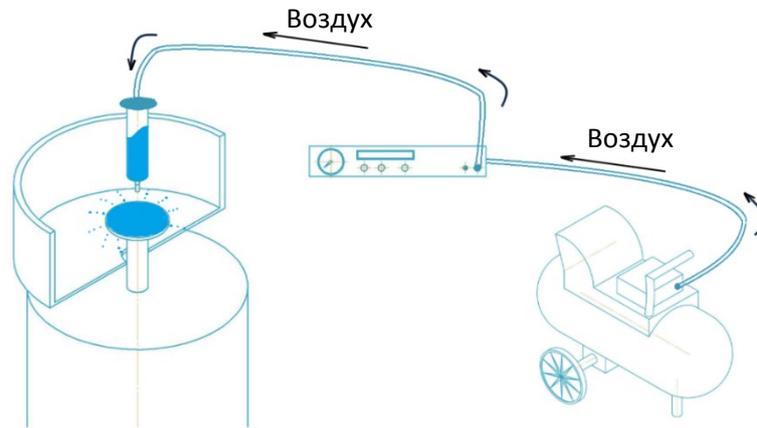


Рис. 1. Схема процесса центробежного распыления
Fig. 1. Diagram of the centrifugal atomization process

Съемка осуществлялась с помощью высокоскоростной камеры Casio EX-F1 при частоте съемки 1200 кадров/с. Формирование толстой пленки на поверхности чаши, вторичное образование струй и преждевременное распыление жидкости считались некорректным режимом центробежного распыления.

Для определения величин радиуса гидравлического скачка R_c и высоты пленки жидкости H использовали следующие уравнения [9]:

$$R_c = 0,55 \left(\frac{\rho Q^2}{\mu \omega} \right)^{\frac{1}{4}},$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;
 Q – объемный расход, м³/с;
 μ – динамическая вязкость, Па·с;
 ω – скорость вращения чаши, рад/с;

$$H = \left[\frac{3 \mu Q}{2 \pi \rho \omega^2 r^2 \cos \alpha} \right]^{\frac{1}{3}},$$

где r – радиус чаши, м;
 α – угол наклона чаши.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поведение жидкости в момент касания вращающегося диска

При соприкосновении жидкости с вращающейся чашей происходит формирование дискового объема жидкости вокруг струи, который затем растягивается к периферии. При попадании струи в центр вращающейся чаши наблюдается спокойное растягивание пленки к периферии и распыление на краю чаши. При отклонении струи от центра чаши появляются крупные фрагменты, которые упруго отскакивают от поверхности, формируя крупные капли. Происходит преждевременное распыление жидкости.

Увеличение расстояния до чаши приводит к нарушению сплошности струи, ее распаду на части и увеличению вероятности отклонения от центра, как следствие – появлению преждевременного распыления в момент касания поверхности чаши (рис. 2).



Рис. 2. Изменение высоты подачи жидкости от чаши при потоке 6,69 кг/ч и гладкой обработке чаши:
a – 20 мм; **b** – 50 мм; **c** – 150 мм
Fig. 2. Changing the height of liquid feed from the bowl at a flow rate of 6.69 kg/h and smooth bowl processing:
a – 20 mm; **b** – 50 mm; **c** – 150 mm

При изменении шероховатости поверхности мы можем наблюдать, что чем выше чистота поверхности чаши, тем более равномерно распределяется жидкость по поверхности чаши (рис. 3).

Поведение жидкости на поверхности чаши при установившемся процессе вращения

Изменение потока жидкости. Расчет потоков жидкости при различном диаметре игл и давлении, а также радиусов гидравлического скачка и толщин пленки показал, что при увеличении потока распыла с 3,96 до 42,35 кг/ч радиус гидравлического скачка увеличивается примерно в 3 раза – с 1,83 мм до 6 мм. При этом высота пленки жидкости, согласно расчетам, увеличивается только в 2 раза – с 0,34 до 0,62 мм (таблица 1).

При постоянной подаче жидкости на чашу при диаметре иглы 0,8 мм (рис. 4) и давлении до 2 атм. наблюдалось образование спиралей на поверхности. Распыление происходило по траектории этих спиралей. Наблюдалась нехватка потока жидкости для ее распределения по всей поверхности чаши. При превышении давления 2 атм. из-за увеличения скорости струи происходит

вторичное распыление в виде направленных ручейков до кромки чаши.

При диаметре иглы 1,5 мм (рис. 5) и давлении до 2 атм. наблюдается почти гладкая поверхность пленки на чаше с небольшими спиральями и ведется распыление по всей периферии чаши и по спиральям. Толщина пленки на поверхности больше, чем при диаметре иглы 0,8 мм. При росте давления более 2 атм. спиралей на поверхности нет, а само распыление ведется только через край чаши. Таким образом, при недостаточном потоке жидкости происходит формирование спиралевидных потоков, которые распыляются на кромке чаши или до нее. При достаточном потоке наблюдается сплошная пленка жидкости, которая полностью распыляется на кромке чаши. Увеличение потока приводит к росту толщины пленки, а следовательно, размера частиц.

Изменение высоты подачи жидкости. Если изменять высоту подачи жидкости на чашу при малом потоке 6,69 кг/ч, видно, что чем меньше расстояние до чаши, тем более равномерный слой образовывается на ней, однако наблюдаются спирали, которые сближаются на расстоянии до 50 мм (рис. 6). По траектории движения



Рис. 3. Изменение шероховатости поверхности при потоке 6,69 кг/ч и расстоянии до чаши 50 мм:
a – гладкая чаша; *b* – чаша без обработки
Fig. 3. Changing the surface roughness at a flow rate of 6.69 kg/h and a distance to the bowl of 50 mm:
a – a smooth bowl; *b* – a bowl without treatment

Таблица 1. Расчет параметров жидкости при центробежном распылении
Table 1. Calculation of liquid parameters during centrifugal atomization

Диаметр иглы, мм	Давление, атм.	Поток, кг/ч	Радиус гидравлического скачка, мм	Высота пленки, мм
0,8	1	3,96	1,83	0,34
	2	6,69	2,38	0,39
	4	9,25	2,80	0,42
1,5	1	21,18	4,24	0,52
	2	34,45	5,40	0,59
	4	42,35	6,00	0,62

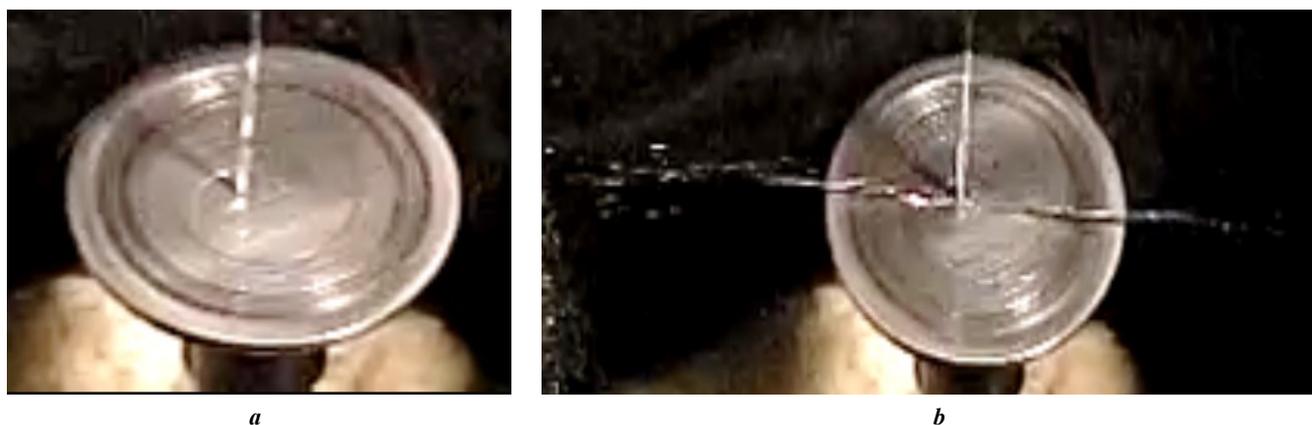


Рис. 4. Изменение давления при подаче жидкости на поверхность чаши без обработки, диаметр иглы 0,8 мм:
a – 1 атм.; *b* – 2 атм.
Fig. 4. Changing pressure when liquid is supplied to the surface of the bowl without treatment, needle diameter is 0.8 mm:
a – 1 atm.; *b* – 2 atm.



Рис. 5. Изменение давления при подаче жидкости на поверхность чаши без обработки, диаметр иглы 1,5 мм:
a – 1 атм.; *b* – 2 атм.
Fig. 5. Changing pressure when liquid is supplied to the surface of the bowl without treatment, needle diameter is 1.5 mm:
a – 1 atm.; *b* – 2 atm.



Рис. 6. Изменение расстояния от иглы до гладкой поверхности чаши:
a – 50 мм; *b* – 100 мм; *c* – 150 мм
Fig. 6. Changing the distance from the needle to the smooth surface of the bowl:
a – 50 mm; *b* – 100 mm; *c* – 150 mm

этих спиральных образований можно наблюдать распыление на краю чаши в виде ручейков. Как предполагается, основное распыление в данном случае будет проходить через эти ручейки. При высоте подачи струи от 100 до 150 мм наблюдалось двойное распыление (рис. 6).

Влияние смачивания поверхности чаши. Получена почти полная несмачиваемость поверхности (рис. 7). В ходе эксперимента были испробованы различные варианты обработки поверхности чаши: нанесение масла, воска и других материалов, не смачиваемых экспериментальным раствором. Однако при скоростях вращения чаши 10000 об/мин модельная жидкость смывала нанесенные слои. В нашем случае при постоянной подаче жидкости через иглу диаметром 0,8 мм на несмачиваемой поверхности наблюдается уменьшение количества и размеров спиралей. Только после 4 атм. происходит преждевременное распыление жидкости через струйки на моменте входа жидкости, и они образуются не сразу от начала подачи жидкости на чашу (рис. 8).

Изменение геометрии чаши. Эксперименты проводились с иглой диаметром 0,8 мм. На гладкой поверхности чаши жидкость распределяется более равномерно,

и пленка становится более тонкой, в отличие от чаши без обработки. Характер спиралей и струй сохраняется при изменении давления для этих типов чаш (рис. 9). Если увеличить шероховатость поверхности за счет грубой абразивной обработки, то наблюдается ухудшение процесса распыления – как при начальном моменте касания жидкости чаши, так и при установившемся процессе (рис. 10). Очевидно, что грубая поверхность чаши вносит сильные возмущения в поток жидкости, приводящие к его разрушению в виде струек и капель разного размера.

При отсутствии бортов вторичное распыление наблюдается в виде капель, которые летят под углом к поверхности чаши. Борт с углом 90° обеспечивает распределение попадающих в результате вторичного распыления крупных струй и капель жидкости по его поверхности и их распыление на кромке чаши. Таким образом, доля вторичного распыления при наличии бортов снижается, и процесс становится более устойчивым.

При диаметре иглы 1,5 мм размер пленки, распыляемой от чаши с бортами, уменьшается, в отличие от чаши без бортов. На поверхности чаши пленка жидкости образуется аналогично чаше без бортов (рис. 11).



Рис. 7. Капля воды на несмачиваемой поверхности
Fig. 7. A drop of water on a non-wetted surface



Рис. 8. Изменение давления при подаче на несмачиваемую поверхность чаши:
a – 1 атм.; *b* – 4 атм.
Fig. 8. Changing pressure when supplying to a non-wetted surface of a bowl:
a – 1 atm.; *b* – 4 atm.

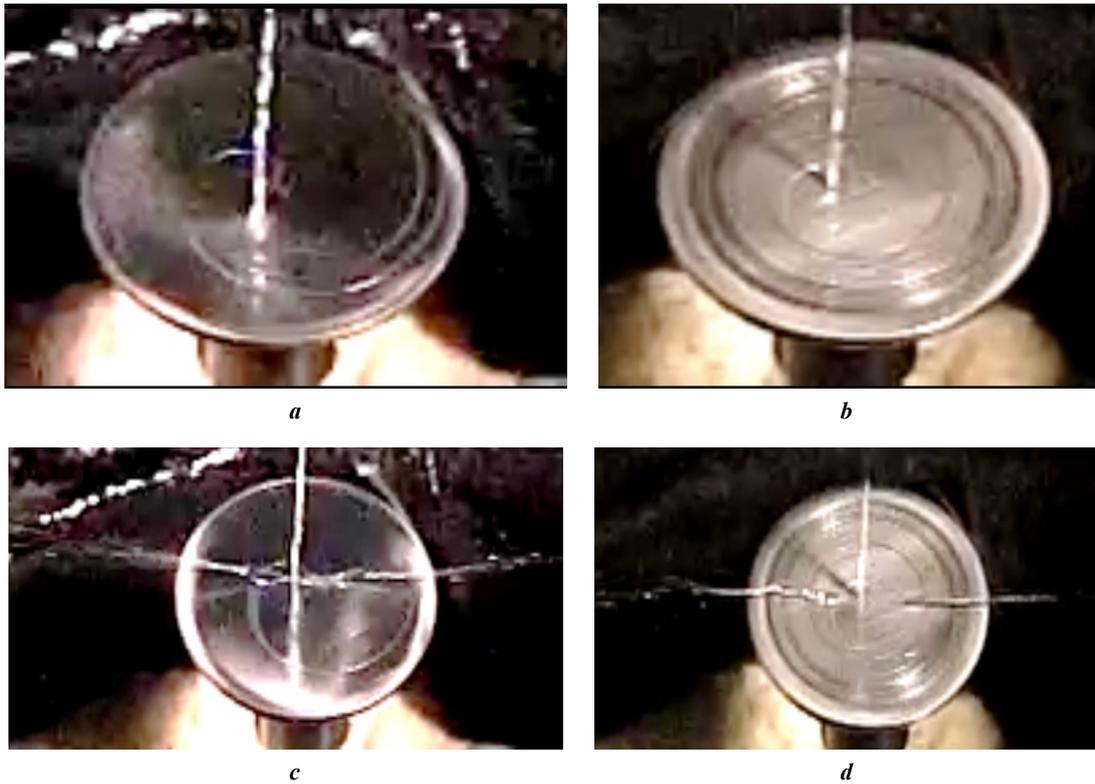


Рис. 9. Изменение давления подаваемой жидкости на чашу:
a – 1 атм., гладкая поверхность чаши; *b* – 1 атм., поверхность чаши без обработки;
c – 2 атм., гладкая поверхность чаши; *d* – 2 атм., поверхности чаши без обработки

Fig. 9. Changing the pressure of the liquid supplied to the bowl:
a – 1 atm., smooth bowl surface; *b* – 1 atm., untreated bowl surface;
c – 2 atm., smooth bowl surface; *d* – 2 atm., untreated bowl surface



Рис. 10. Изменение давления подаваемой жидкости на шероховатую поверхность чаши: *a* – 1 атм.; *b* – 2 атм.
Fig. 10. Changing the pressure of the liquid supplied to the rough bowl surface: *a* – 1 atm.; *b* – 2 atm.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поведение жидкости в момент касания вращающегося диска

При попадании струи в центр вращающейся чаши жидкость попадает в область с нулевой радиальной скоростью. Происходит растекание ее по поверхности чаши с постоянным увеличением скорости по мере движения от центра. При попадании

струи на некотором расстоянии от центра часть жидкости растекается по поверхности чаши, а часть упруго отскакивает в виде крупных фрагментов, которые имеют скорость ниже, чем частицы с кромки чаши. Эта часть жидкости не диспергируется до мелких капель из-за нехватки энергии. Можно предположить, что такое преждевременное распыление может приводить к появлению крупных частиц порошка при распылении расплава.

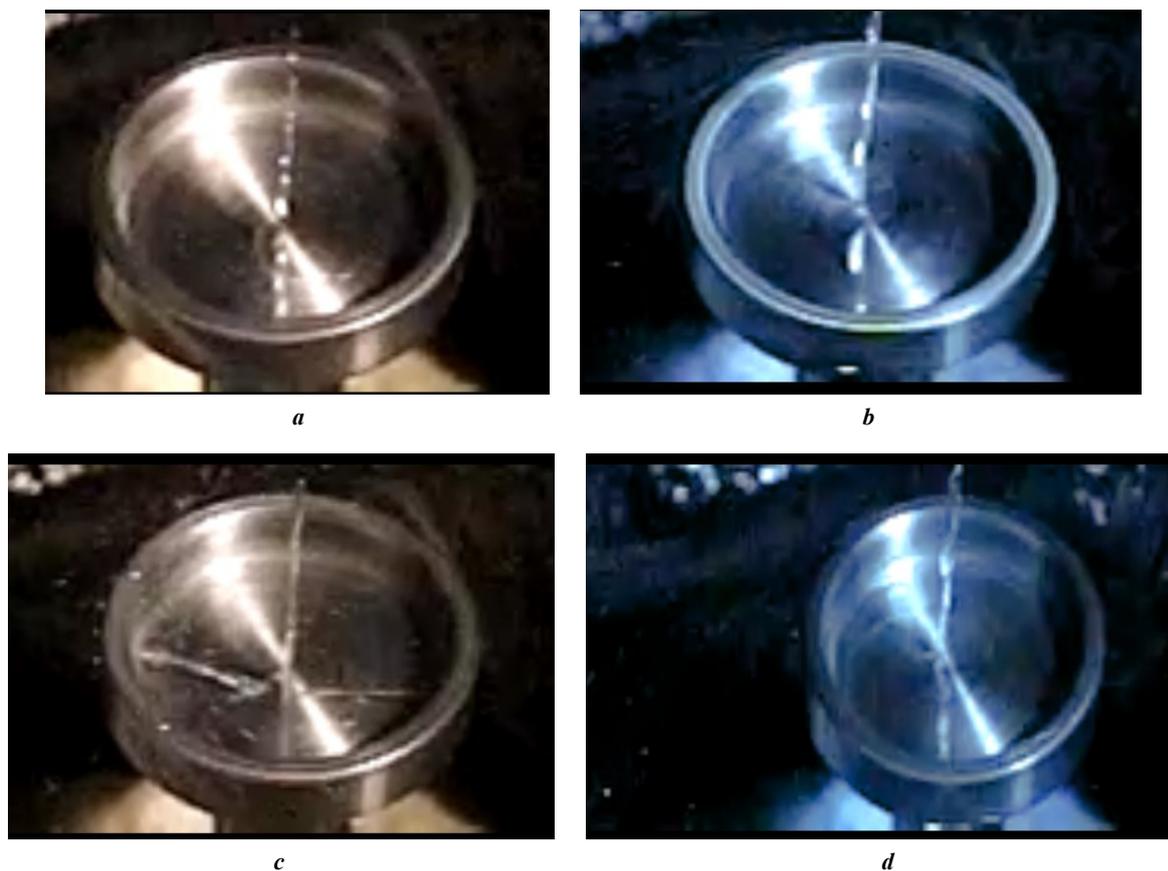


Рис. 11. Изменение давления и диаметр иглы при распылении жидкости на чаше с бортами:

a – диаметр 0,8 мм, давление 1 атм.; b – диаметр 1,5 мм, давление 1 атм.;

c – диаметр 0,8 мм, давление 2 атм.; d – диаметр 1,5 мм, давление 2 атм.

Fig. 11. Changing the pressure and needle diameter when spraying liquid on a bowl with sloped wall:

a – diameter is 0.8 mm, pressure is 1 atm.; b – diameter is 1.5 mm, pressure is 1 atm.;

c – diameter is 0.8 mm, pressure is 2 atm.; d – diameter is 1.5 mm, pressure is 2 atm.

В литературных источниках не приводится разделение процесса на начальный (момент касания струи чаши) и установившийся. В основном это связано с тем, что оценкой процесса распыления обычно является фракционный состав полученного порошка. В целом на начальном этапе важны все факторы, которые играют определяющую роль при установившемся процессе: дистанция подачи струи [16; 17], величина потока, смачивание поверхности чаши [19]. Увеличение высоты падения струи приводит к ее частичному разрушению и возможности упругого отражения части жидкости. Появление крупных капель при попадании жидкости на шероховатую поверхность связано с сильным возмущением, возникающим при попадании потока жидкости на шероховатую поверхность. Снижение шероховатости способствует образованию стабильной пленки на поверхности чаши.

Поведение жидкости на поверхности чаши при установившемся процессе вращения

Изменение потока жидкости. Одним из важных условий диспергирования жидкости с краев чаши является соответствие ее потока условиям образования на поверхности чаши сплошного слоя. В противном случае появляются источники вторичного распыления.

В зависимости от потока и расстояния до чаши образуется гидравлический скачок в виде кольца жидкости. На гидравлическом скачке происходит разрыв пленки из-за избытка жидкости и дальнейшего перехода в струи, что соответствует данным работы [10]. При любом потоке жидкости, если она не попадает в центр, происходит вторичное распыление за счет разрушения пленки на гидравлическом скачке из-за неравномерной радиальной скорости на пике скачка.

В литературе не обнаружено описания формирования спиралевидных потоков на поверхности чаши. Их образование, очевидно, связано с недостатком жидкости для заполнения всей поверхности чаши. В таком случае жидкость должна была растекаться в очень тонкий слой, поэтому поверхностное натяжение приводило к формированию спиральных потоков. В этом случае распыление всегда наблюдалось на выходе спиралей к краю чаши. В основном оно носило вид капельного распыления. При увеличении потока происходит «растягивание» жидкости по поверхности чаши с распылением по всему ее периметру. По мере увеличения потока и формирования сплошного слоя жидкости на поверхности чаши распыление смещается в направлении струйного и пленочного. Это хорошо согласуется с литературными данными [12].

Влияние смачивания поверхности чаши. Несмотря на указание в [18; 19] необходимости смачивания расплавом поверхности чаши, в модельном эксперименте не удалось выявить определенные закономерности в поведении жидкости на чашах в условиях полного смачивания и несмачивания. В результате эксперимента на чаше с покрытиями получены противоречивые данные, которые требуют дополнительных исследований. Возможно, это произошло в результате разрушения и отрыва нанесенного барьерного слоя.

Изменение геометрии чаши. Как показали результаты визуализации процесса, наличие бортов на кромке чаши обязательно для достижения устойчивого процесса распыления. Это хорошо согласуется с результатами [10; 21]. И хотя в источниках описаны эксперименты на чашах с бортами под углом 60–70°, применение чаши с бортами под углом 90° тоже показало свою эффективность. Эксперимент подтвердил, что наличие бортов увеличивает дистанцию, которую проходит жидкость до распыления [10], однако это, по нашему мнению, не главное преимущество наличия бортов на чаше. Основное преимущество состоит в том, что капли жидкости в результате преждевременного распыления, летящие под углом к поверхности чаши, могут распределяться по борту и затем распыляться через его кромку в виде малых капель. Особое значение это может иметь при плохом смачивании жидкостью поверхности чаши.

Изменение высоты подачи жидкости. Изменение высоты падения струи в пределах 20–150 мм оказывает существенное влияние на появление вторичного распыления. Существует оптимальная высота подачи струи жидкости, что хорошо согласуется с литературными данными [11]. В нашем эксперименте оптимальным для устойчивого распыления модельной жидкости являлся диапазон 50–100 мм. Слишком большая высота падения струи приводит к ее преждевременному разрушению на более мелкие струи и капли, которые при непопадании точно в центр чаши упруго отскакивают, провоцируя вторичное распыление крупных частиц. При приближении точки подачи струи к чаше более вероятно попадание в ее центр, что приводит к устойчивости процесса распыления. Слишком близкое расположение затрудняет технологическую возможность реализации подачи жидкости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В целом результаты, полученные с помощью диспергирования модельной жидкости, коррелируют с литературными данными о процессе и позволяют оценить поведение жидкости на поверхности чаши с точки зрения формирования равномерного фронта диспергирования без вторичного распыления.

2. Начало процесса диспергирования в момент контакта струи жидкости должно обеспечивать точное попадание струи в центр вращающейся чаши, подачу жидкости необходимо проводить с высоты в диапазоне 50–100 мм. В противном случае появляются источники вторичного распыления.

3. Основным важным параметром процесса диспергирования является создание потока жидкости, который обеспечивает равномерное покрытие поверхности чаши пленкой жидкости и распыление со всей периферии чаши. При нехватке потока происходят разрывы жид-

кости и формирование спиралей и струй, которые диспергируются на периферии чаши.

4. На гладкой чаше, в отличие от чаши без обработки, лучше смачиваемость и тоньше пленка, которая образуется на поверхности. Шероховатая чаша хуже всего подходит для распыления.

5. На чаше с бортами наблюдается уменьшение толщины пленки на краю чаши, более равномерное распыление. Борты также разрушают струи и капли жидкости в пленку, которая затем диспергируется с кромок.

6. Согласно литературным данным, смачивание должно способствовать движению жидкости в пределах пограничного слоя к периферии чаши. На модельной жидкости в условиях ограничения смачивания были получены противоположные результаты, что требует дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Труфанов Д.А., Котов С.А., Шалашов Е.В., Часов В.В. Получение металлических порошков методом центробежного распыления с использованием вращающегося стакана // *Металлообработка*. 2016. № 4. С. 57–62. EDN: [XBJSYJ](#).
2. Ahmed M., Youssef M.S. Characteristics of mean droplet size produced by spinning disk atomizers // *Journal of Fluids Engineering*. 2012. Vol. 134. № 7. Article number 071103. DOI: [10.1115/1.4006819](#).
3. Ahmed M., Youssef M.S. Influence of spinning cup and disk atomizer configurations on droplet size and velocity characteristics // *Chemical Engineering Science*. 2014. Vol. 107. P. 149–157. DOI: [10.1016/j.ces.2013.12.004](#).
4. Ahmed M., Amighi A., Ashgriz N., Tran H.N. Characteristics of liquid sheets formed by splash plate nozzles // *Experiments in Fluids*. 2008. Vol. 44. № 1. P. 125–136. DOI: [10.1007/s00348-007-0381-4](#).
5. Bao Qieng, Yang Yiru, Wen Xiaochun, Guo Lei, Guo Zhancheng. The preparation of spherical metal powders using the high-temperature remelting spheroidization technology // *Materials & Design*. 2021. Vol. 199. Article number 109382. DOI: [10.1016/j.matdes.2020.109382](#).
6. Moghimian P., Poirie T., Habibnejad-Korayem M., Zavala J.A., Kroeger J., Marion F., Larouche F. Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys // *Additive Manufacturing*. 2021. Vol. 43. Article number 102017. DOI: [10.1016/j.addma.2021.102017](#).
7. Runwal J., Ambekar R., Dhokey N.B. A novel process for spheroidization of irregular shaped metallic powders // *Powder Metallurgy*. 2021. Vol. 64. № 1. P. 1–7. DOI: [10.1080/00325899.2020.1848974](#).
8. Wang Hao, Cui Yujie, Yang Jianwen, Chiba Yumi, Fujieda Masa, Yamanaka Kenta, Chiba Jinghiko. Investigation of dynamic balance process to obtain fine powder by plasma rotating electrode process (PREP) method // *Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*. 2024. Article number 24-00035. DOI: [10.2497/jjspm.24-00035](#).
9. Liu Junxiang, Yu Qingbo, Qin Qin. Numerical study on film disintegration by centrifugal atomisation using rotating cup // *Powder Metallurgy*. 2013. Vol. 56. № 4. P. 288–294. DOI: [10.1179/1743290113Y.0000000053](#).

10. Shanthar R., Chen Kun, Abeykoon C. Powder-based additive manufacturing: A critical review of materials, methods, opportunities, and challenges // *Advanced Engineering Materials*. 2023. Vol. 25. № 19. Article number 2300375. DOI: [10.1002/adem.202300375](https://doi.org/10.1002/adem.202300375).
11. Liu Junxiang, Yu Qingbo, Guo Qiang. Experimental investigation of liquid disintegration by rotary cups // *Chemical Engineering Science*. 2012. Vol. 73. P. 44–50. DOI: [10.1016/j.ces.2012.01.010](https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.01.010).
12. Li Hui Ping, Tsakiroopoulos P., Johnson T. Centrifugal atomisation of alloys // *Key Engineering Materials*. 2001. Vol. 189/191. P. 245–251. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.189-191.245](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.189-191.245).
13. Ahmed M., Abou Al-Sood M.M., Ali A. A one-dimensional model of viscous liquid jets breakup // *Journal of Fluids Engineering*. 2011. Vol. 133. № 11. Article number 114501. DOI: [10.1115/1.4004909](https://doi.org/10.1115/1.4004909).
14. Peng Lei, Li Long, Zhao Wei. Numerical study of inlet eccentricity on liquid film spreading and splitting in centrifugal granulation assisted thermal energy recovery // *Powder Technology*. 2023. Vol. 414. Article number 118079. DOI: [10.1016/j.powtec.2022.118079](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118079).
15. Tan Yu, Ding Bin, Shi Jun, Yan Hui, Wu Yingchun, Wu Junjun. Modelling the film fragmentation of industrial-scale centrifugal granulation of high-temperature molten slag // *Powder Technology*. 2023. Vol. 426. Article number 118654. DOI: [10.1016/j.powtec.2023.118654](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118654).
16. Deng Huaxia, Ouyang Huajiang. Vibration of spinning discs and powder formation in centrifugal atomization // *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, physical and engineering sciences*. 2010. Vol. 467. № 2119. P. 361–380. DOI: [10.1098/rspa.2010.0099](https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0099).
17. Zhao Yuyuan. Analysis of flow development in centrifugal atomization: Part I. Film thickness of a fully spreading melt // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2004. Vol. 12. № 5. P. 959–971. DOI: [10.1088/0965-0393/12/5/013](https://doi.org/10.1088/0965-0393/12/5/013).
18. Zhao Yuyuan. Analysis of flow development in centrifugal atomization: Part II. Disintegration of a non-fully spreading melt // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2004. Vol. 12. № 5. P. 973–983. DOI: [10.1088/0965-0393/12/5/014](https://doi.org/10.1088/0965-0393/12/5/014).
19. Шемякина О.А., Шейхалиева З.И., Шейхалиев Ш.М. Получение порошков припоев центробежным распылением расплава // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2010. № 3. С. 52–57. EDN: [MULYST](https://doi.org/10.1002/adem.202300375).
20. Sungkhaphaitoon P., Likhidkan W., Kitjaidiaw S., Wisutmethangoon S., Plookphol T. Effect of atomizer disc geometry on zinc metal powder production by centrifugal atomization // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vol. 271-272. P. 232–236. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.271-272.232](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.271-272.232).
21. Peng Hao, Wang Na, Wang Dongxiang, Ling Xiang. Experimental Study on Critical Characteristics of Liquid Atomization by Spinning Disk // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016. Vol. 55. № 21. P. 6175–6185. DOI: [10.1021/acs.iecr.6b00401](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00401).
- using a rotating cup. *Metalloobrabotka*, 2016, no. 4, pp. 57–62. EDN: [XBJSYJ](https://doi.org/10.1115/1.4006819).
2. Ahmed M., Youssef M.S. Characteristics of mean droplet size produced by spinning disk atomizers. *Journal of Fluids Engineering*, 2012, vol. 134, no. 7, article number 071103. DOI: [10.1115/1.4006819](https://doi.org/10.1115/1.4006819).
3. Ahmed M., Youssef M.S. Influence of spinning cup and disk atomizer configurations on droplet size and velocity characteristics. *Chemical Engineering Science*, 2014, vol. 107, pp. 149–157. DOI: [10.1016/j.ces.2013.12.004](https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.12.004).
4. Ahmed M., Amighi A., Ashgriz N., Tran H.N. Characteristics of liquid sheets formed by splash plate nozzles. *Experiments in Fluids*, 2008, vol. 44, no. 1, pp. 125–136. DOI: [10.1007/s00348-007-0381-4](https://doi.org/10.1007/s00348-007-0381-4).
5. Bao Qieng, Yang Yiru, Wen Xiaochun, Guo Lei, Guo Zhancheng. The preparation of spherical metal powders using the high-temperature remelting spheroidization technology. *Materials & Design*, 2021, vol. 199, article number 109382. DOI: [10.1016/j.matdes.2020.109382](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109382).
6. Moghimian P., Poirie T., Habibnejad-Korayem M., Zavala J.A., Kroeger J., Marion F., Larouche F. Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys. *Additive Manufacturing*, 2021, vol. 43, article number 102017. DOI: [10.1016/j.addma.2021.102017](https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102017).
7. Runwal J., Ambekar R., Dhokey N.B. A novel process for spheroidization of irregular shaped metallic powders. *Powder Metallurgy*, 2021, vol. 64, no. 1, pp. 1–7. DOI: [10.1080/00325899.2020.1848974](https://doi.org/10.1080/00325899.2020.1848974).
8. Wang Hao, Cui Yujie, Yang Jianwen, Chiba Yumi, Fujieda Masa, Yamanaka Kenta, Chiba Jinghiko. Investigation of dynamic balance process to obtain fine powder by plasma rotating electrode process (PREP) method. *Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 2024, article number 24-00035. DOI: [10.2497/jjspm.24-00035](https://doi.org/10.2497/jjspm.24-00035).
9. Liu Junxiang, Yu Qingbo, Qin Qin. Numerical study on film disintegration by centrifugal atomization using rotating cup. *Powder Metallurgy*, 2013, vol. 56, no. 4, pp. 288–294. DOI: [10.1179/1743290113Y.0000000053](https://doi.org/10.1179/1743290113Y.0000000053).
10. Shanthar R., Chen Kun, Abeykoon C. Powder-based additive manufacturing: A critical review of materials, methods, opportunities, and challenges. *Advanced Engineering Materials*, 2023, vol. 25, no. 19, article number 2300375. DOI: [10.1002/adem.202300375](https://doi.org/10.1002/adem.202300375).
11. Liu Junxiang, Yu Qingbo, Guo Qiang. Experimental investigation of liquid disintegration by rotary cups. *Chemical Engineering Science*, 2012, vol. 73, pp. 44–50. DOI: [10.1016/j.ces.2012.01.010](https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.01.010).
12. Li Hui Ping, Tsakiroopoulos P., Johnson T. Centrifugal atomisation of alloys. *Key Engineering Materials*, 2001, vol. 189/191, pp. 245–251. DOI: [10.4028/www.scientific.net/KEM.189-191.245](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.189-191.245).
13. Ahmed M., Abou Al-Sood M.M., Ali A. A one-dimensional model of viscous liquid jets breakup. *Journal of Fluids Engineering*, 2011, vol. 133, no. 11, article number 114501. DOI: [10.1115/1.4004909](https://doi.org/10.1115/1.4004909).
14. Peng Lei, Li Long, Zhao Wei. Numerical study of inlet eccentricity on liquid film spreading and splitting in centrifugal granulation assisted thermal energy recovery. *Powder Technology*, 2023, vol. 414, article number 118079. DOI: [10.1016/j.powtec.2022.118079](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.118079).

REFERENCES

1. Trufanov D.A., Kotov S.A., Shalashov E.V., Chasov V.V. Receiving metallic powders by centrifugal atomization

15. Tan Yu, Ding Bin, Shi Jun, Yan Hui, Wu Yingchun, Wu Junjun. Modelling the film fragmentation of industrial-scale centrifugal granulation of high-temperature molten slag. *Powder Technology*, 2023, vol. 426, article number 118654. DOI: [10.1016/j.powtec.2023.118654](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118654).
16. Deng Huaxia, Ouyang Huajiang. Vibration of spinning discs and powder formation in centrifugal atomization. *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, physical and engineering sciences*, 2010, vol. 467, no. 2119, pp. 361–380. DOI: [10.1098/rspa.2010.0099](https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0099).
17. Zhao Yuyuan. Analysis of flow development in centrifugal atomization: Part I. Film thickness of a fully spreading melt. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2004, vol. 12, no. 5, pp. 959–971. DOI: [10.1088/0965-0393/12/5/013](https://doi.org/10.1088/0965-0393/12/5/013).
18. Zhao Yuyuan. Analysis of flow development in centrifugal atomization: Part II. Disintegration of a non-fully spreading melt. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2004, vol. 12, no. 5, pp. 973–983. DOI: [10.1088/0965-0393/12/5/014](https://doi.org/10.1088/0965-0393/12/5/014).
19. Shemyakina O.A., Sheikhalieva Z.I., Sheikhaliev S.M. Obtaining solder powders by centrifugal atomization of melt. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2010, vol. 51, no. 3, pp. 250–254. DOI: [10.3103/S1067821210030107](https://doi.org/10.3103/S1067821210030107).
20. Sungkhaphaitoon P., Likhidkan W., Kitjaidiaw S., Wisutmethangoon S., Plookphol T. Effect of atomizer disc geometry on zinc metal powder production by centrifugal atomization. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 271–272, pp. 232–236. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.271-272.232](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.271-272.232).
21. Peng Hao, Wang Na, Wang Dongxiang, Ling Xiang. Experimental Study on Critical Characteristics of Liquid Atomization by Spinning Disk. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, vol. 55, no. 21, pp. 6175–6185. DOI: [10.1021/acs.iecr.6b00401](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00401).

Study of centrifugal atomisation mechanisms based on a simulated experiment

*Evgeny Yu. Zhukov**, engineer

of Chair “Technologies and Systems for Automated Design of Metallurgical Processes” (1101)

Alibek S. Naurzalinov, technician

of Chair “Technologies and Systems for Automated Design of Metallurgical Processes” (1101)

*Igor N. Pashkov*¹, Doctor of Sciences (Engineering),

professor of Chair “Technologies and Systems for Automated Design of Metallurgical Processes” (1101)

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow (Russia)

*E-mail: ZhukovEY@mai.ru,
jezzacome@gmail.com

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2511-2845>

Received 15.02.2024

Revised 16.04.2024

Accepted 28.10.2024

Abstract: The process of melt dispersion on a rotating bowl is a common method for producing metal powders. It is difficult to study the dispersion process on real melts, including by visualisation methods. Therefore, it is proposed to study the influence of such factors as the jet fall height, liquid flow rate, surface wetting, and the presence of a bowl wall on the process of obtaining small droplets using a model liquid without crystallisation, recording the process by high-speed shooting. The purpose of this work is to determine the most favourable dispersion conditions, when all the supplied liquid turns into droplets without the formation of large droplets, additional jets leading to secondary spraying. A glycerol solution in water with a viscosity equal to the viscosity of tin melt was chosen as a model liquid. The dispersion process was shot on a high-speed camera with a shooting frequency of 1,200 frames per second. It was found that when increasing the melt flow, a change in the spray mode is observed. With an increase in pressure, the flow and kinetic interaction of the jet with the surface of the bowl, increase, and consequently, the excess liquid, which is sprayed prematurely, increases. At any flow of the supplied liquid, if the liquid does not get to the centre, secondary spraying occurs due to the destruction of the film, on the hydraulic jump, because of the uneven radial velocity at the peak of the jump. When the feed height changes from 100 to 150 mm, secondary spraying in the form of droplets is observed at the hydraulic jump area. The number of spirals and secondary spraying affect the increase in the size of the particle fraction. In the range of the jet fall height from 50 to 100 mm, an optimal process is observed, in which it is possible to obtain the smallest fraction. In the experiment, a tendency to improve the spraying process when increasing the bowl surface finish was observed. Due to the walls of the bowl, the path of the liquid before it leaves the bowl increases, drops flying above the surface of the bowl are destroyed into a film, therefore, the dispersion process improves.

Keywords: centrifugal melt atomisation; melt dispersion on a rotating bowl; liquid flow; metal powder; hydrodynamic conditions; high-speed shooting.

For citation: Zhukov E.Yu., Naurzalinov A.S., Pashkov I.N. Study of centrifugal atomisation mechanisms based on a simulated experiment. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 4, pp. 39–49. DOI: [10.18323/2782-4039-2024-4-70-4](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2024-4-70-4).