

УДК 621.039.542.4:66.936.4

**В. П. Лихошва, А. Н. Тимошенко, Е. А. Рейнталь,
Л. А. Бондарь**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ФОРМА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ В РЕАКТОРАХ СМЕШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НАЛОЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО И ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЙ

Проведено математическое моделирование состояния и поведения жидкости в различных реакторах смешения. Исследованы особенности изменения формы свободной поверхности жидкости в зависимости от угловой скорости и расхода газа. Определен необходимый минимальный уровень жидкости для рассматриваемого процесса получения композиционного материала. Выбрана оптимальная форма реактора смешения для данного процесса.

Ключевые слова: реактор смешения, форма свободной поверхности жидкости, двухфазная математическая модель, каверна, эллиптический параболоид вращения, минимальный уровень жидкости.

Проведено математичне моделювання стану та поведінки рідини в різних реакторах змішування. Досліджено особливості зміни форми вільної поверхні рідини в залежності від кутової швидкості і витрати газу. Визначено необхідний мінімальний рівень рідини для розглянутого процесу отримання композиційного матеріалу. Обрана оптимальна форма реактора змішування для даного процесу.

Ключові слова: реактор змішування, форма вільної поверхні рідини, двофазна математична модель, каверна, еліптичний параболоїд обертання, мінімальний рівень рідини.

Mathematical modeling of the state and behavior of fluid in the various mixing reactors and particularities of free surface shape changes depending on the angular velocity and the gas flow were studied. The required minimum level of fluid for the process of a composite material obtaining was determined. The optimal form of the mixing reactor was selected for this process.

Keywords: mixing reactor, shape of the free surface of liquid, two-phase mathematical model, cavity, an elliptic paraboloid of revolution, minimum level of liquid.

Перспектива широкого применения металлических композиционных материалов в промышленности ограничена сложностью их производства и изготовления из них изделий сложной конфигурации. По сравнению с волокнистыми, слоистыми и другими видами композиционных материалов дисперсно-упрочненные металлические материалы отличаются возможностью получения более широкой

ISSN 0235-5884. Процессы литья. 2012. № 5 (95)

номенклатуры готовых изделий сложной конфигурации с минимальной последующей обработкой или без нее, а также реализации непрерывных технологических процессов. Методы жидкофазного формирования суспензий и эмульсий с последующим скоростным затвердеванием позволяют получать композиционные материалы со структурой замороженной эмульсии или суспензии.

Практически очень сложно погрузить частицы в расплав и равномерно распределить их в объеме, поскольку существует очень мало способов, позволяющих без дополнительного физико-механического воздействия получать металлические эмульсии или суспензии, в которых наблюдается, например, близкое соответствие плотностей частиц и расплава.

Известны различные способы воздействия металла на расплав: перемешивание, диспергирование и рециркуляция двухфазных сред. Механическое перемешивание осуществляется с помощью мешалок, применение которых имеет ряд недостатков: быстрый износ при повышенных температурах и агрессивном шлаке, возможность загрязнения металла неметаллическими и шлаковыми включениями, образовавшимися при разрушении футеровки мешалки; дополнительные экономические и энергетические затраты и т. д. С целью устранения этих недостатков применяют методы бесконтактного силового воздействия на металлические расплавы, которые основаны на использовании сил гравитации, инерции, электростатических, магнитостатических и др. Главным преимуществом этих методов является отсутствие дополнительных рабочих элементов, вводимых в расплав. Тем не менее, эти методы обладают рядом недостатков, из которых основными являются низкие скорости перемешивания, неравномерность распределения скоростей тока расплава в объеме, высокая стоимость оборудования.

В настоящей работе интенсификация массо- и газообменных процессов достигается применением гравитационных и инерционных сил в виде механического (вращение жидкости) и пневматического (струей воздуха или инертного газа) воздействий на расплав.

Целью данных исследований является определение зависимости изменения формы свободной поверхности жидкости в реакторе смешения от перечисленных выше воздействий, а также оптимальной формы и геометрических размеров устройств для получения эмульсии или суспензии (смешением жидкой основы и твердой композитной составляющей); исследование особенностей движения жидкости в таких устройствах и ряда других необходимых технологических параметров.

Чтобы определить оптимальную конструкцию устройства смешения (одновременно смешивающего и сливного устройства) для исследований выбрали следующие геометрические формы: цилиндр, эллиптический параболоид и конус с углами наклона образующей относительно вертикальной оси 20 и 45°.

Газ подавали через фурму. Ее конструкция предусматривает наличие двух газовых потоков, которые пересекаются, и это способствует смешиванию газа в ее внутреннем канале. Первый поток имитирует подачу сыпучих ингредиентов с постоянным расходом, второй — газолазерный поток с варьируемым расходом газа. Имитирующий газолазерный поток в процессе лазерной обработки также служит защитой оптической системы от паров и дисперсных частиц. Суммарный расход двух потоков газа на выходе из внутреннего канала фурмы диаметром 5 мм изменяли в интервале значений от $3,24 \times 10^{-4}$ до $4,1 \times 10^{-4}$ кг/с. Фурму располагали по центру реактора на расстоянии $h = 7,5$ мм от поверхности жидкости.

Исследования проводили с использованием модельной жидкости (воды), выбор которой осуществляли на основе критериев подобия в ранее проведенных исследованиях [1].

На первом этапе определили необходимый объем жидкости для проведения исследований. Исходя из геометрических размеров реакторов смешения и условий их использования, а также учитывая возможность переливания жидкости через

стенки реакторов и оголение дна при большой угловой скорости вращения, выбрали начальный объем, который составлял 50 мл, и провели пробные исследования поведения жидкости. Для объема модельной жидкости экспериментальным методом определили диапазон значений скорости вращения реактора смешения (ω) от 0 до 160 об/мин.

Для определения формы свободной поверхности вращения жидкости в реакторах провели математическое моделирование на основе методов численной гидродинамики с использованием двухфазной математической модели пакета ANSYS CFX. Поставленную задачу решали с использованием упрощенных уравнений Навье-Стокса путем привлечения некоторых гипотез и эмпирических зависимостей [2, 3], основанных на их осреднении по Фавру-Рейнольдсу и использовании моделей турбулентной вязкости для их замыкания.

Математическое моделирование процесса состояния и поведения жидкости при вращении реактора смешения проводили в несколько этапов.

На первом этапе процесс вращения реакторов смешения без влияния давления газа (воздуха) моделировали неподвижным соединением на границе раздела фаз жидкость-воздух.

На следующем же этапе процесс вращения реакторов смешения с подачей дополнительного давления газа моделировали условием связи «статор-ротор» по границе раздела проточной части каналов фурмы и воздуха.

Отличительной особенностью данной работы по сравнению с ранее проводимыми исследованиями [4] является применение условия шероховатой стенки (величина $R = 0,25$ мм).

При расчете турбулентности использовали следующие модели: k - ε Ментера — для воды, «Dispersed Phase Zero Equation» (модель, основанная на геометрическом масштабе течения и средней скорости) — для воздуха.

На рис. 1 представлены результаты первого этапа математического моделирования, которые показывают изменение формы свободной поверхности жидкости за счет наложения вращения реакторов. Для всех реакторов характерно, что с увеличением значения диаметра D и скорости вращения парабола (образующая при вращении эллиптический параболоид) становится более выпуклой, а следовательно, увеличивается расстояние H ($H_{ц}$, $H_{эл.п}$, H_{20^0} , H_{45^0}) от линии 1 свободной поверхности спокойной жидкости.

В коническом реакторе с углом наклона образующей конуса 20^0 в зависимости от скорости его вращения изменение формы свободной поверхности жидкости существенно меньше, чем в других реакторах. Это связано с наименьшим значением диаметра ($D = 55$ мм) данного реактора. При максимальной скорости вращения величина расстояния $H_{20^0} = 10,41$ мм.

Для реакторов в виде цилиндра и эллиптического параболоида изменение формы свободной поверхности жидкости отличается незначительно, так как величины диаметров D для этих реакторов имеют небольшие отличия — 60 и 64 мм соответственно. Для этих реакторов при максимальной скорости вращения величины расстояния $H_{ц}$ и $H_{эл.п}$ равны соответственно 12,8 и 15,02 мм.

Реактор конической формы с углом наклона образующей конуса $\alpha = 45^0$ имеет максимальный диаметр $D = 73$ мм, изменение свободной формы поверхности жидкости в зависимости от угловой скорости реактора смешения сказывается наиболее существенно. При максимальной угловой скорости реактора смешения ($\omega = 160$ об/мин) расстояние H_{45^0} равно 18,93 мм.

Для оценки правильности полученных результатов рассмотрели тестовую задачу, имеющую аналитическое решение определения формы свободной поверхности жидкости при вращении для разных форм. При этом ввели упрощение: все частицы жидкости имеют угловую скорость, равную угловой скорости вращения реактора

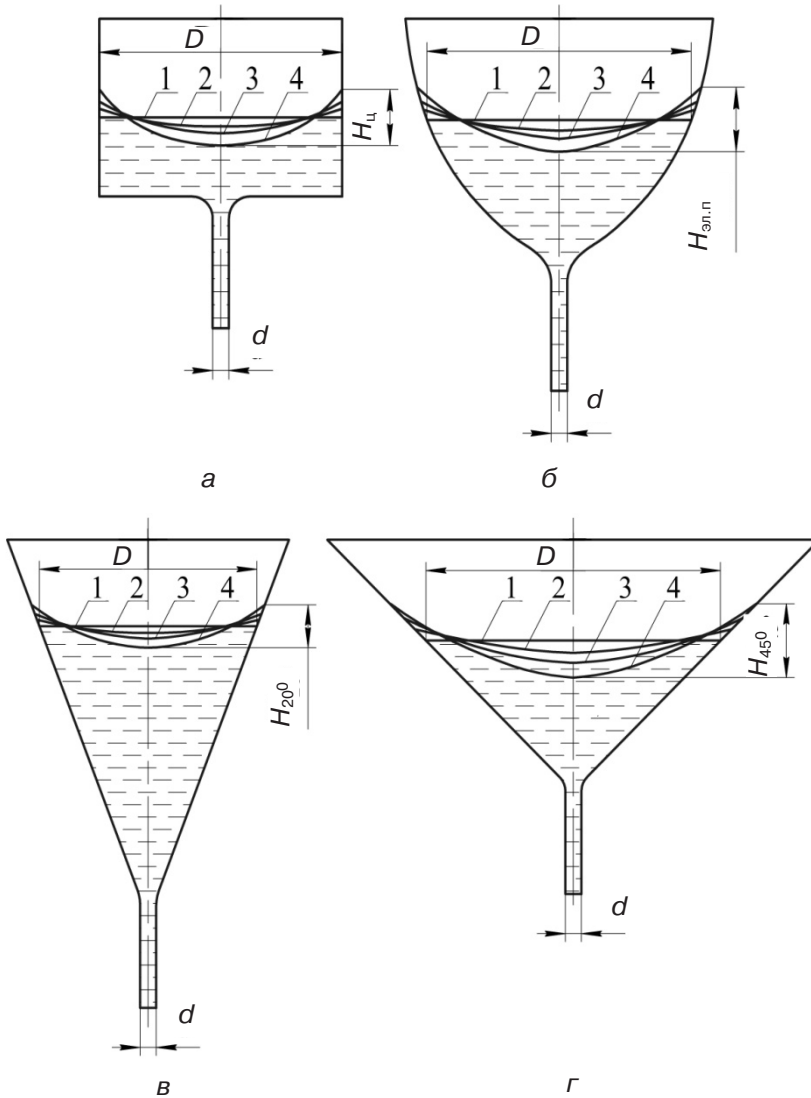


Рис. 1. Формы реакторов смешения: а – цилиндрическая; б – эллиптический параболоид; в, г – конические (в, $\alpha = 20^\circ$; г, $\alpha = 45^\circ$); форма свободных поверхностей модельной жидкости при отсутствии внешних воздействий; при скоростях вращения: 2 – 90; 3 – 120; 4 – 160 об/мин

смешения. Решение находили на основе дифференциальных уравнений равновесия жидкости Эйлера [5]

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} = 0, \\ Y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} = 0, \\ Z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\frac{\partial P}{\partial x}$, $\frac{\partial P}{\partial y}$, $\frac{\partial P}{\partial z}$ – градиенты давления в направлении соответствующих координат

натных осей; X, Y, Z — проекции единичных массовых сил на соответствующие оси; ρ — плотность жидкости.

На жидкость, находящуюся в сосуде, который равномерно вращается вокруг вертикальной оси с постоянной угловой скоростью ω (рис. 1), помимо сил тяжести действуют и центробежные силы. После ряда преобразований получили формулу для определения высоты параболоида H

$$H = \frac{\omega^2 \cdot R_0^2}{2g}, \tag{5}$$

где R_0 — радиус резервуара; g — ускорение свободного падения.

Сопоставили полученные значения расстояния H при различных скоростях на основе обоих расчетов, которые приведены в табл. 1. Сравнения проводили при одинаковых исходных данных, которые свидетельствуют о хорошей сходимости.

Таблица 1. Сравнение результатов численного и аналитического расчетов для величины H

Реакторы	Значения угловой скорости ω , об/мин					
	30	60	90	120	140	160
	H , мм					
Цилиндрической формы	<u>0,5</u> 0,45	<u>2</u> 1,81	<u>3,98</u> 4,07	<u>7,2</u> 7,24	<u>9,81</u> 9,86	<u>12,8</u> 12,88
Формы эллиптического параболоида	<u>0,62</u> 0,51	<u>2,19</u> 2,06	<u>4,8</u> 4,63	<u>8,51</u> 8,24	<u>11,32</u> 11,22	<u>15,02</u> 14,65
Конической формы с углом наклона образующей 20°	<u>0,3</u> 0,38	<u>1,5</u> 1,52	<u>3,21</u> 3,42	<u>6,01</u> 6,09	<u>8,31</u> 8,28	<u>10,41</u> 10,82
Конической формы с углом наклона образующей 45°	<u>0,6</u> 0,67	<u>2,57</u> 2,68	<u>5,73</u> 6,03	<u>10,08</u> 10,72	<u>14,66</u> 14,66	<u>18,93</u> 19,07

Примечание: в числителе — значения, полученные путем численного расчета с помощью программы ANSYS CFX, в знаменателе — путем аналитического расчета

На втором этапе моделирования рассмотрели задачу изменения состояния свободной поверхности жидкости в неподвижном и вращающемся реакторах при воздействии воздушного потока по центру реактора, который вытесняет часть жидкости, изменяя при этом форму свободной поверхности, образуя вываг каверны.

В неподвижных реакторах при воздействии на поверхность жидкости газового потока форма и величина образующейся каверны имеют вид, близкий по форме к эллиптическому параболоиду вращения и не зависят от формы реактора [4], а изменяется только с увеличением расхода газа. Так, при массовом расходе газа $Q = 3,24 \times 10^{-4}$ кг/с глубина каверны (проекция на ось z кривой ВС, рис. 2) равна $H' = 10$ мм, а с увеличением расхода газа до $Q = 4,1 \times 10^{-4}$ кг/с увеличивается расстояние $H' = 12,6$ мм.

Изменение формы свободной поверхности жидкости при вращении (рис. 2) показано кривой ABC. Кривая AB является частью свободной поверхности, образованной вращением жидкости, а BC — линия поверхности каверны. Форма кривой AB и расстояние от линии стационарного уровня жидкости до точки B изменяются в зависимости от угловой скорости, расхода газа и геометрических размеров реакторов, что влияет на изменение глубины каверны. Проекция кривой ABC на ось z (величина H_1) отражает величину прогиба свободной поверхности жидкости по координате z (рис. 2, табл. 2).

Для конического реактора смешения с углом наклона образующей конуса 20° при увеличении скорости вращения изменения величины H_1 наименьшие и варьируются в интервале значений от 10,2 до 21,32 мм. Для реакторов в виде цилиндра и эллиптического параболоида изменения H_1 варьируются в интервале значений

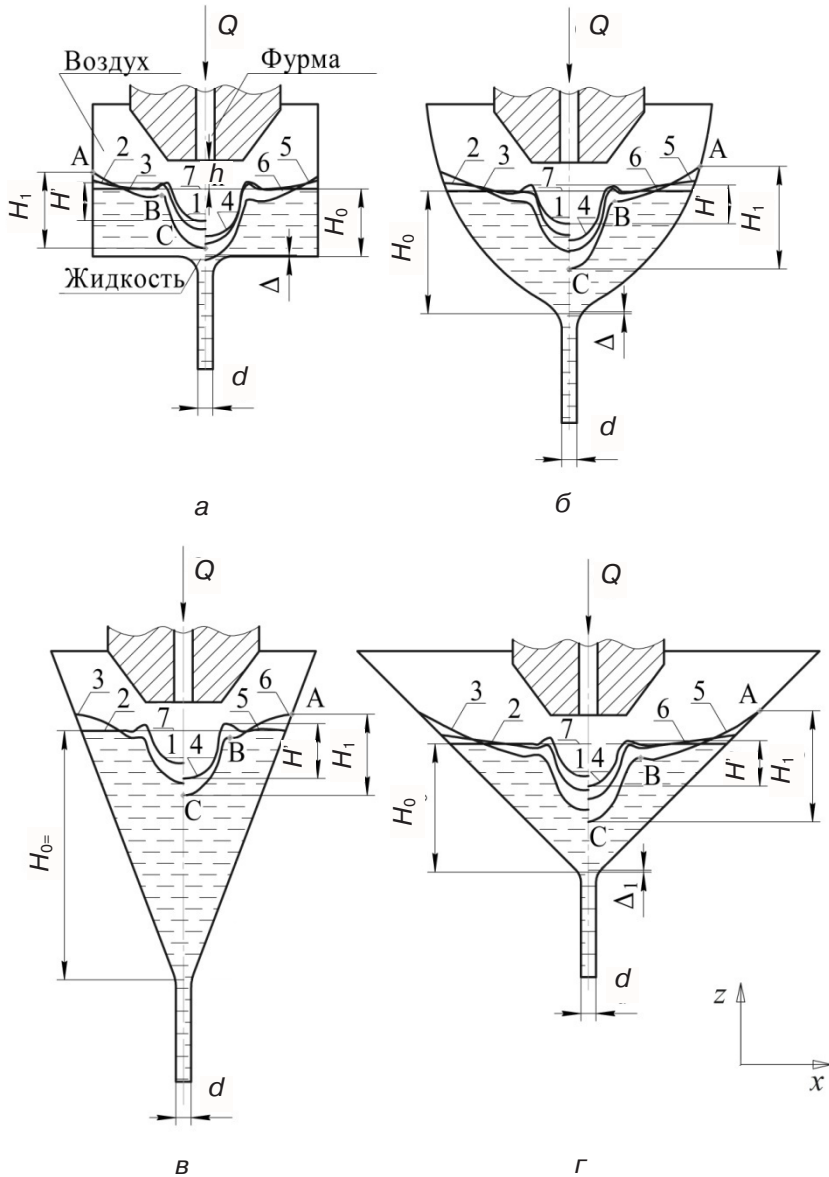


Рис. 2. Форма реакторов смешения с учетом расстояния h : а – цилиндрическая; б – эллиптический параболоид; в, г – конические (в, $\alpha = 20^\circ$; г, $\alpha = 45^\circ$); форма свободных поверхностей модельной жидкости при воздействии воздушного потока: 1 – $Q = 3,24 \times 10^{-4}$ кг/с без вращения; 2 – $Q = 3,24 \times 10^{-4}$ кг/с и скорости вращения 90; 3 – $Q = 3,24 \times 10^{-4}$ кг/с и скорости вращения 160; 4 – $Q = 4,1 \times 10^{-4}$ кг/с без вращения; 5 – $Q = 4,1 \times 10^{-4}$ кг/с и скорости вращения 90; 6 – $Q = 4,1 \times 10^{-4}$ кг/с и скорости вращения 160 об/мин; 7 – начальный уровень жидкости при отсутствии внешних воздействий

10,45-23,06 и 10,52-27,23 мм соответственно, а для реактора конической формы с углом наклона образующей конуса $\alpha = 45^\circ$ величина H_1 изменяется в максимальных пределах от 10,74 до 29,34 мм.

Таким образом, скорость вращения реактора смешения влияет на величину H_1 и глубину каверны, что характерно для всех реакторов. На глубину каверны также дополнительно оказывает влияние изменение расхода газа.

Для оптимизации процесса получения металлических суспензий и эмульсий

Таблица 2. Значения H_1 в зависимости от скорости вращения, расхода газа и формы реакторов смешения

Реакторы	Значения угловой скорости ω , об/мин					
	30	60	90	120	140	160
	H_1 , мм					
Цилиндрической формы	<u>10,45</u>	<u>11,87</u>	<u>13,52</u>	<u>17,15</u>	<u>18,75</u>	<u>21,82</u>
	12,97	14,33	15,87	19,23	21,97	23,06
Формы эллиптического параболоида	<u>10,52</u>	<u>11,89</u>	<u>13,94</u>	<u>18,33</u>	<u>20,78</u>	<u>24,58</u>
	13,1	14,18	17,12	20,52	23,51	27,23
Конической формы с углом наклона образующей 20°	<u>10,2</u>	<u>10,86</u>	<u>12,24</u>	<u>15,02</u>	<u>17,39</u>	<u>18,48</u>
	12,81	13,81	15,11	17,69	19,47	21,32
Конической формы с углом наклона образующей 45°	<u>10,74</u>	<u>12,37</u>	<u>14,47</u>	<u>19,5</u>	<u>23,84</u>	<u>25,66</u>
	13,18	14,54	17,77	21,57	25,41	29,34

Примечание: в числителе — значения H_1 (мм) при $Q = 3,24 \times 10^{-4}$ кг/с, в знаменателе — значения H_1 (мм) при $Q = 4,1 \times 10^{-4}$ кг/с

поставлена задача минимизации объема жидкости находящегося в реакторе смешения, что обусловлено синхронизацией подачи порошковых материалов в процессе обработки расплава. Минимальный уровень и объем жидкости определены на основе расчетов математического моделирования при условиях не захвата воздуха в сливной канал и оголения стенок реактора. Для этого величину начального уровня жидкости в реакторах (H_0) изменяли таким образом, чтобы расстояние между нижней точкой каверны и поверхностью сливного канала составляло величину Δ , корректирующую увеличение минимального объема жидкости, а расстояние h оставили постоянным. Из-за неравномерности вращения и пульсации давления газа Δ приняли равным 0,5 мм.

Результаты проведенного моделирования представлены в табл. 3.

Таблица 3. Значения минимального уровня жидкости в реакторах H_0

Реакторы	Значения угловой скорости ω , об/мин						
	0	30	60	90	120	140	160
	H_0 , мм						
Цилиндрической формы	<u>8,5</u>	<u>8,73</u>	<u>9,41</u>	<u>10,54</u>	<u>12,1</u>	<u>13,43</u>	<u>14,94</u>
	11,1	11,33	12,01	13,14	14,75	16,0	17,54
Формы эллиптического параболоида	<u>8,5</u>	<u>8,6</u>	<u>8,92</u>	<u>9,45</u>	<u>10,19</u>	<u>10,8</u>	<u>11,51</u>
	11,1	11,2	11,52	12,05	12,75	13,4	14,11
Конической формы с углом наклона образующей 20°	<u>31,5</u>	<u>31,5</u>	<u>31,5</u>	<u>31,5</u>	<u>31,5</u>	<u>31,5</u>	<u>31,5</u>
	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5	31,5
Конической формы с углом наклона образующей 45°	<u>10</u>	<u>10,05</u>	<u>10,21</u>	<u>10,48</u>	<u>10,85</u>	<u>11,16</u>	<u>11,52</u>
	12,6	12,65	12,81	13,08	13,45	13,76	14,12

Примечание: в числителе — для $Q = 3,24 \times 10^{-4}$ кг/с, в знаменателе — для $Q = 4,1 \times 10^{-4}$ кг/с

Установили, что для реактора цилиндрической формы каверна при максимальных скорости вращения и расходе газа при объеме жидкости 50 мл достигает поверхности сливного канала. Использование этого реактора для меньших объемов жидкости возможно при снижении скорости вращения реактора до 140 об/мин или расхода газа до $3,24 \times 10^{-4}$ кг/с, причем объем жидкости все же остается наибольшим по сравнению с остальными реакторами смешения.

В реакторах формы эллиптического параболоида и двух конических снижение начального уровня жидкости (H_0) приводит к уменьшению значения диаметра D , а значит, и уменьшению влияния угловой скорости на изменение формы свободной поверхности жидкости. Однако, дополнительное воздействие воздушного потока,

подаваемого через фурму при определенном расходе газа, может привести к оголению боковых стенок реактора. Например, для конического реактора с углом наклона образующей 45° каверна уже при расходе газа $Q = 3,24 \times 10^{-4}$ кг/с достигает поверхности боковых стенок реактора, что является недопустимым условием. Исправить этот недостаток можно, увеличивая значение Δ в 4 раза, то есть корректирующий параметр принимает значение $\Delta_1 = 2$ мм.

Для конического реактора с углом наклона образующей 20° выполнить условия минимизации объема жидкости возможно также при увеличении корректирующего параметра Δ . Однако соотношения минимального размера фурмы, применяемой для данного процесса и малого угла наклона образующей для этого реактора, не позволяет ее глубоко опустить. Расчеты показали, что для данного реактора значения H_0 могут быть не меньше 31,5 мм.

Следовательно, конический реактор с углом наклона образующей 20° в выбранном диапазоне изменения угловой скорости и расхода газа при заданных условиях не позволяет варьировать минимальный уровень жидкости, а значит и полностью минимизировать объем жидкости. Для конического реактора с углом наклона образующей 45° варьировать минимальным объемом жидкости становится возможным при увеличении корректирующего параметра Δ в 4 раза. Для формы цилиндрического реактора выполнить условия минимизации возможно в ограниченном интервале изменения угловой скорости и расхода газа. Минимальный объем жидкости для этого реактора остается наибольшим по сравнению с остальными реакторами смешения. Реактор в виде эллиптического параболоида имеет оптимальную форму, в этом случае можно изменять значения минимального уровня жидкости в зависимости от скорости вращения и расхода газа в выбранном диапазоне при заданном значении корректирующего параметра Δ .

Таким образом, в пределах поставленной задачи установлена зависимость изменения формы свободной поверхности жидкости от скорости вращения реактора, дополнительного расхода газа, формы и геометрических размеров реактора и фурмы. Определен необходимый минимальный уровень жидкости для процесса получения композиционного материала. Выбрана оптимальная форма реактора смешения в виде эллиптического параболоида.



Список литературы

1. Моделирование процессов формирования суспензионных расплавов / В. П. Лихошва, В. Л. Найдек, Е. А. Рейнталь и др. // Процессы литья. – 2009. – № 3. – С. 11-14.
2. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
3. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. – М.: Мир, 1990. – 725 с.
4. Лихошва В. П., Рейнталь Е. А., Бондарь Л. А. Воздействие газовых потоков, подаваемых с помощью фурмы, на жидкие среды // Процессы литья. – 2011. – № 3. – С. 14-23.
5. Вильнер Я. М., Ковалев Я. Т., Некрасов Б. Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. – Минск: Высш. шк., 1976. – 416 с.

Поступила 18.07.2012