

## ОСОБЕННОСТИ ВСКИПАНИЯ И ДРОБЛЕНИЯ КАПЕЛЬ ЭМУЛЬСИИ

Розглядаються процеси закипання дисперсної фази емульсії з урахуванням формування парового шару на межі розділу фаз. Показана можливість взаємного подрібнення закипаючих крапель з урахуванням сил, діючих на їх поверхнях, а також особливості сил, які діють від декількох сусідніх крапель одночасно.

Рассматриваются процессы закипания дисперсной фазы эмульсии с учетом формирования парового слоя на границе раздела фаз. Показана возможность взаимного дробления закипающих капель с учетом сил, действующих на их поверхностях, а также особенности сил, которые действуют от нескольких соседних капель одновременно.

The processes of effervescence of dispersion phase of emulsion taking into account forming of steam layer on the border of section of phases are examined. Possibility of the mutual crushing of drops beginning to boil taking into account forces, operating on their surfaces, and also feature, in consideration of forces which operate from a few neighboring drops simultaneously is shown.

$F$  – сила;  
 $g$  – ускорение;  
 $h$  – расстояние;  
 $R$  – радиус;  
 $t$  – температура;  
 $w$  – скорость движения;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\sigma$  – межфазное натяжение;  
 $\tau$  – время.

### Нижние индексы:

0 – начальное значение;  
 $i = 1, 2$  – номер капли;  
 $Bo$  – Бонда;  
 $We$  – Вебера;  
 $\sigma$  – капиллярная;  
 $m$  – масло;  
 $cr$  – критическое.

В промышленности широкое применение находят смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), которые в наибольшей степени определяют снижение изнашивания режущего инструмента и улучшение качества обрабатываемых поверхностей как в технологии металлообработки, так и других производств [1]. СОЖ должны обладать хорошей смачиваемостью поверхности, этого достигают введением соответствующих ПАВ, которые также повышают и охлаждающую способность среды. Явления десорбции ПАВ и укрупнения частиц дисперсной фазы СОЖ, которая представляет собой эмульсию, определяют устойчивость эмульсии к расслоению и дальнейшему ее использованию. После рабочей зоны в эмульсии происходит укрупнение частиц дисперсной фазы, а также возможно обращение компонентов эмульсии.

Для снижения затрат экономически целесообразным является повторное использование отработанных СОЖ, но для этого их состав необходимо привести к нормативному (очистить от механических примесей), а также получить наиболее устойчивую к расслоению структуру, т.е. наименьший размер дисперсной фазы. С этой целью важным есть рассмотрение процессов, происходящих с эмульсией при эмульгировании и гомогенизации.

В литературных источниках практически отсутствуют работы, в которых при решении указанной задачи учтены процессы снижения поверхностного натяжения при наличии ПАВ. Особенностью физических свойств эмульсий типа вода-масло-пар (воздух) является наличие адсорбционных слоев ПАВ, вследствие чего поверхностное натяжение на границе раздела фаз

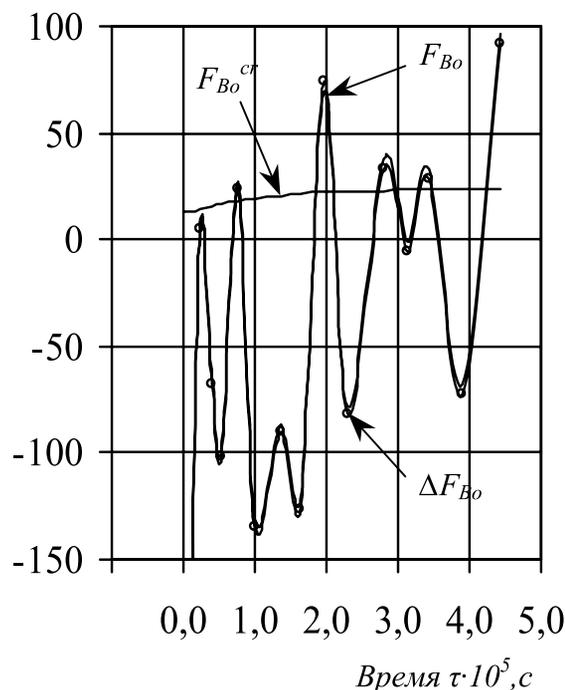
вода-масло значительно уменьшается. Опытные данные [2] свидетельствуют о том, что процесс образования новой фазы (пара) инициируется внутренним тепловым воздействием на поверхности масляных частиц. Таким образом, например, при резком сбросе давления, предварительно нагретая эмульсия будет оказываться в состоянии пересыщения термолабильной водной фазой (вода перегрета относительно температуры насыщения при данном давлении), т.е. содержать избыточное количество теплоты. Этот избыток теплоты затрачивается на работу образования паровой прослойки и дальнейшее парообразование. Из экспериментов [2] видно, что среднее время вскипания водомасляных эмульсий снижается с повышением концентрации ПАВ, наблюдается слабая зависимость среднего времени вскипания от диаметра капли.

Работы [2, 3] предполагают использование высоких скоростей схлопывания парового пузырька для процессов дробления жидких включений эмульсий, но моделей, использующих совместный процесс роста (схлопывания) пузырька и дробления включений, не существует.

В технологиях эмульгирования, диспергирования и гомогенизации наибольшее применение и использование находят конечные объемы двух и более взаимно не смешивающихся жидкостей [2, 3], которые находятся либо в неподвижном состоянии, либо в виде потока эмульсии. Проведенные теоретические и экспериментальные работы предполагают в большинстве своем гомогенное зародышеобразование паровой фазы, не учитывая при этом ПАВ, но, например, в эмульсиях типа вода-масло количество центров парообразования практически равно числу распределенных дисперсных частиц. Это указывает на то, что процесс зародышеобразования паровой фазы происходит гетерогенно с заранее известным количеством центров парообразования.

Основными факторами, обуславливающими дробление капель в жидкой среде, являются относительная скорость, ускорение потока, разности плотностей фаз и др. Каждый из этих факторов может стать причиной неустойчивости. Чем меньше начальный радиус капли, тем интенсивнее растет паровая фаза, т.е. выше скорость и ускорение границы раздела. При различных радиу-

Сила  $F \cdot 10^4, Н$



**Рис. 1.** Изменение сил, действующих на каплю радиусом  $R_1 = 100$  мкм, во времени при  $R_2 = 10$  мкм,  $t_0 = 180$  °С,  $p_\infty = 0,1$  МПа,  $h = 250$  мкм.

сах капель могут наблюдаться как совместные максимумы (минимумы) скорости (ускорения), так и существенные разности данных скоростей (ускорений). Тогда, учитывая, что скорости для разных начальных радиусов имеют различные амплитуды и частоты изменения во времени, можно предполагать, что в какой-то момент времени возможно возникновение неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, а для ускорения — Релея-Тейлора. В качестве примера рассмотрим две капли эмульсии с  $R_1 = 100$  мкм и  $R_2 = 10$  мкм, которые находятся на расстоянии  $h$  друг от друга, при начальной температуре 180 °С и соответствующем давлении насыщения. Расчет производим с учетом сил, которые действуют на частицу и вызывают дробление, деформацию либо ее перемещение. Сила, вызванная ускорением либо замедлением потока, а также динамическим напором на поверхности рассматриваемых капель, соответственно равна:

$$F_{Bo_i} = 4\pi\rho_m g_{p_i} R_i^3; F_{We_i} = 6\pi\rho_m R_i^2 |w_{p_i}| w_{p_i}. \quad (1)$$

Возможно существование минимума капиллярной силы. Будем считать, что минимум определяется силой Лапласа и соответствующая сила равна

$$F_{\sigma_i} = 8\pi\sigma R_i . \quad (2)$$

Критические силы, приводящие к появлению неустойчивости Релея-Тейлора или Кельвина-Гельмгольца, соответственно равны:

$$F_{Bo}^{cr} = 40\pi\sigma R_i ; \quad F_{We}^{cr} = 30\pi\sigma R_i . \quad (3)$$

Результаты расчетов по уравнениям (1)-(3) с учетом уравнений [4] показывают, что наибольший эффект в разрушение капель приносит неустойчивость Релея-Тейлора, во всех рассмотренных случаях она играет наибольшую роль.

Как видно из рис. 1, при расстоянии между каплями, равному 250 мкм, т.е. в 2,5 раза превышающем начальный радиус большой капли, дробление будет наблюдаться во втором пике колебания силы  $F_{Bo}$ , в то время, как при меньших расстояниях – в первом пике. При небольших расстояниях  $h$  разрушение парового объема будет происходить практически сразу после сброса давления. По мере увеличения расстояния время до разрушения увеличивается, что и следовало ожидать, переходя в пределе до бесконечности, если капли сольются друг с другом. При снижении начальной температуры до 130 °С даже при  $h = 150$  мкм эффектов дробления или деформации для большой капли не наблюдается вообще.

Рассмотрим силы, действующие на капли дисперсной фазы, находящиеся в окружении других капель при их закипании. В качестве объекта рассмотрения примем эмульсию, представленную в [2]. Для данной эмульсии видно, что между «большими» каплями находятся «малые» капли, которые могут служить источниками повышенных динамических сил при закипании и тем самым инициировать процессы дробления более крупных капель из-за значительной разности в ускорениях и/или скоростях роста между ними. Рассматривая каплю эмульсии, можно сделать вывод о том, что основную роль будут оказывать силы, действующие по нормальной составляющей к поверхности капли, т.е. силы, направленные либо к центру капли, либо от него.

Важным является рассмотрение сил, действующих на противоположные стороны включения. Определяя, например, ускорение и вызванную им силу на одной стороне капли и противоположной стороне, будем считать, что если две противоположные силы направлены к центру рассматриваемой капли, то общая сила, действующая на каплю, равна сумме данных двух сил. Если обе силы направлены от центра капли, то общая сила также равна сумме двух векторных сил. В том случае, если обе силы действуют разнонаправленно по отношению к центру капли, т.е. одна направлена в пространстве, определяющей будем считать ту силу, которая имеет большее значение из двух действующих. Таким образом, на включение дисперсной фазы, которое не закипает, т.е. не создает никакого противодействия силам, действующим на него, определяющим воздействием, приводящим к возможному разрушению, будет максимум двух сил, которые действуют на противоположные стороны.

В случае же, когда капля эмульсии начинает закипать, она имеет свою силу, которая будет противодействовать внешнему воздействию со стороны других источников. Тогда определяющей силой может быть та, которая действует на одну сторону включения и превышает силу противодействия. Все это является основным отличием в рассмотрении сил, действующих на каплю, которая закипает, в отличие от не закипающей капли. Это означает, что необходимо учитывать два данных максимума и определять из них главный. Конечно, возможно совпадение в существовании этих максимумов сил.

## **Выводы**

С учетом сил, действующих на поверхности капель, можно в достаточно простой постановке рассмотреть процессы дробления больших капель дисперсной фазы соседними малыми каплями при различных начальных температурах и расстояниях между ними, а также указать на возможные перемещение, деформацию или дробление капель. Рассмотрение сил, действующих на включения дисперсной фазы эмульсии с учетом ее закипания и влияния соседних включений, показывает необходимость нахождения как ми-

---

нимум двух максимальных усилий, которые могут совпадать по углу своего действия на каплю, либо значительно различаться по этому углу действия. Важным является учет времени зарождения паровой прослойки на частицах разных размеров, и для его определения будет использован эксперимент. Учет перемещения и слияния капель будет проведен дальнейшим усовершенствованием модели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Смазочно-охлаждающие* технологические средства для обработки металлов резанием. Справочник. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
2. *Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И.* Теплофизические процессы в эмульсиях. – К.: Наукова думка, 2005. – 265 с.
3. *Долинский А.А., Басок Б.И.* Дискретно – импульсная трансформация энергии в адиабатно вскипающем потоке // Пром. теплотехника. – 2001. – Т.23, №4-5. – С.5 – 20.
4. *Павленко А.М., Климов Р.А., Басок Б.И.* Кинетика испарения в процессах гомогенизации // Пром. теплотехника. – 2006. – Т. 28, №6. – С.14 – 20.