

Дробіння крапель у газовому або рідкому середовищі зумовлює зміни дисперсності робочих систем і швидкості проходження в них технологічних процесів. В апаратах харчових технологій краплі можуть дробитися як самовільно, так і цілеспрямовано. Цілеспрямоване дробіння найчастіше використовують для збільшення площі поверхні контакту з метою прискорення фізико-хімічних процесів, а також для приготування емульсій. В усіх випадках дробіння важливо знати умови та основні характеристики цього процесу.

Стійкість крапель у газовому потоці залежить від відношення сил динамічного напору  $P_{дг} = \rho_r v_r^2 / 2$ , що виникають у лобовій частині краплі внаслідок відносної швидкості руху краплі й потоку і деформують її, та сил поверхневого натягу рідини на границі з газовою фазою, які проявляються через створення лапласівського (капілярного) тиску  $P_{\lambda} = 2\sigma / r_{\kappa} = 4\sigma / d_{\kappa}$  ( $r_{\kappa}$ ,  $d_{\kappa}$  — радіус і діаметр краплі, м) і перешкоджають деформуванню краплі. Умовою рівноваги цих сил є  $P_{дг} = P_{\lambda}$ , або

$$\rho_r v_r^2 / 2 = 4\sigma / d_{\kappa}, \quad (1)$$

де  $\rho_r$ ,  $v_r^2$  — густина, кг/м<sup>3</sup>, і відносна швидкість, м/с, газового потоку;  $\sigma$  — поверхневий натяг, Н/м.

Якщо капілярний тиск перевищує динамічний ( $P_{\lambda} > P_{дг}$ ), то крапля зберігає стійку сферичну форму. За умови рівноваги цих сил крапля зазнає критичної деформації, а якщо переважають сили динамічного тиску, то вона руйнується, тобто роздроблюється газовим потоком.

Рівняння (1) можна записати так:

$$\rho_r v_r^2 d_{\kappa} / \sigma = 8,$$

або

$$We_{\kappa p} = 8, \quad (2)$$

де  $We$  — критерій Вебера, що характеризує процес дробіння крапель, у якому за характерний лінійний розмір взято діаметр краплі  $d_{\kappa}$ :  $We = \rho_r v_r^2 d_{\kappa} / \sigma$ .

Якщо число Вебера, зростаючи, досягає критичних значень  $We_{\kappa p} = 8$ , то краплі починають осцилювати в режимі критичних деформацій, набуваючи форми то видовженого, то сплющеного еліпсоїда. Швидкість деформації краплі під час осциляції, виходячи з аналізу розмірностей, можна оцінити величиною  $v_{осц} \approx \sigma / \mu$ . Фотографування крапель, що осцилюють, у момент падіння після відриву від піпетки показало, що ця оцінка є досить реальною.

Сила динамічного тиску на сплюснений в напрямку руху краплі еліпсоїд більша, ніж на видовжений, тому крапля роздроблюється в момент найбільшого сплюснення. Умовою критичної деформації є збільшення площі поверхні сплющеного еліпсоїда до значення, що переважає суму площ поверхонь двох або кількох нових крапель з таким самим сумарним об'ємом. У цьому випадку існування однієї деформованої краплі з надлишковою вільною поверхневою енергією стає енергетично невигідним і крапля розпадається на дві або кілька близьких за розміром частин.

За швидкістю поширення хвилі осциляції краплі можна оцінити час, що дорівнює чверті періоду осциляції мало деформованої краплі, який є сумір-

ним з часом розпаду краплі й за порядком величини становить  $\tau \approx R_0/\alpha$ . Наприклад, для краплі води діаметром 5 мм

$$\tau = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-3} / 0,072 \approx 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Перші узагальнені дослідження дробіння крапель у газовому потоці виконав М.С. Волинський [1, 2]. Він показав, що для крапель будь-якого діаметра при певній відносній швидкості газового потоку існують нижнє  $We=10,7$  і верхнє  $We=14$  значення чисел Вебера, які відповідають стійкості крапель. При  $We \leq 10,7$  краплі осцилюють у газовому потоці в режимі критичних деформацій, але розпадаються навпіл ще не всі. При  $We=10,7$  роздвоюються практично всі краплі.

Області  $10,7 \leq We \leq 14,0$  відповідає перехідна зона, у межах якої краплі розпадаються на декілька (три, чотири, п'ять, ...) приблизно однакових частин. Кратність дробіння зростає із збільшенням числа  $We$ .

При  $We > 14$  режим дробіння крапель змінюється з одностадійного на двостадійний. Упорядковані коливання переходять у хаотичні, нелінійність коливань інтенсивно зростає, внаслідок чого утворюється велика кількість дрібних крапель різних розмірів.

Наведені значення чисел Вебера приблизні, бо не враховують багатьох факторів: інтенсивності зростання швидкості газового потоку та його напрямку; масштабу турбулентності; густини і в'язкості рідини тощо. Тому різні автори наводять різні значення чисел Вебера. Вважають, що при раптовому введенні крапель у газовий потік (нестационарне дробіння) значення  $We_{cr}$  зменшується приблизно вдвічі.

Зроблені М.С. Волинським і повторені іншими дослідниками іскрові фотознімки та кінознімання процесу одностадійного дробіння крапель [1, 2] показали, що новоутворені краплі певний час залишаються з'єднаними між собою тонкими перетинками, які швидко розпадаються на дрібні крапельки. Це означає, що поряд з краплями основного розміру під час дробіння завжди утворюються на порядок дрібніші краплі — кульки Плато, кількість яких може бути більшою від кількості вторинних крапель основного розміру, а маса, як правило, не перевищує кількох десятків відсотка.

У межах чисел Вебера від 14 до 1000 спостерігаються різні картини двостадійного дробіння крапель.

При  $14 \leq We \leq 20$  дробіння крапель починається з утворення куполоподібного тіла (рис. 1). Краплі різко деформуються, роздуваючись у куполоподібне тіло з тонкою оболонкою (плівкою), випуклою в бік відносного руху газової фази. У першій стадії дробіння розривається тонша передня частина плівки, утворюючи велику кількість дрібних крапельок. Одночасно задня частина куполоподібної оболонки стягується в тор, що вміщує майже 70 % маси початкової краплі. У другій стадії цей тор під дією нелінійних коливань розпадається на більші краплі.

У межах чисел  $20 \leq We \leq 70$  під час інтенсивного збільшення відносної швидкості газу (введення крапель у швидкісний газовий потік) краплі також спочатку розплющуються в тонкий диск, потім середня частина диска розтягується в куполоподібне тіло неправильної форми. Однак у цьому випадку глибина купола в кілька разів менша від його діаметра, а випуклість інколи буває спрямована в протилежний бік щодо відносного руху газової фази.

Інколи (при  $20 \leq We \leq 33$ ) на поверхні такого диска утворюються хвилеподібні горби та впадини, що призводить до розривання середньої частини диска раніше, ніж встигає утворитися куполоподібне тіло. Після дробіння центральної частини диска (або випуклої частини купола) залишається тор, який розривається на краплі трохи пізніше.

При числах Вебера  $We \approx 70$  купол плівки, деформованої перед розпадом краплі, знову випинається в бік відносного руху газової фази, а вздовж осі купола утворюється центральний стрижень (струмінь). Деформована крапля нагадує форму гриба.

При  $We > 70$  настає режим двостадійного дробіння крапель з початковим "здиранням" їхнього поверхневого шару. У цьому режимі внаслідок великої відносної швидкості газу краплі в першій стадії розпаду деформуються в лінзу. Одночасно з цим з верхнього шару навгрянного боку лінзи зриваються дрібні краплини. У другій стадії диск потоншується і розпадається на дрібні скалки.

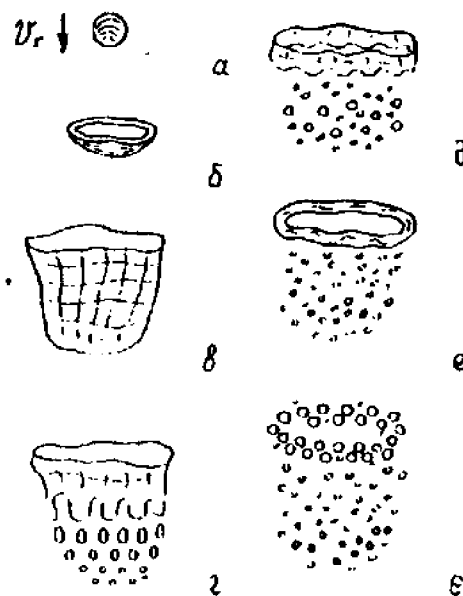
При  $We > 10000$  поступово настає режим однастадійного (вибухового) дробіння, при якому лінза розпадається миттєво з утворенням хмаринки дрібних крапельок.

Зазначені межі чисел Вебера і режими дробіння справедливі для не дуже в'язких рідин, у яких стабілізації форми крапель сприяють лише сили поверхневого натягу. Для рідин з великою в'язкістю (наприклад, касторова олія) до стабілізаційних сил належать ще й сили в'язкості, тому краплі розпадаються при вищих відносних швидкостях газу.

Умови дробіння крапель газовим потоком реалізуються у розпилювальних та високошвидкісних апаратах, значення чисел Вебера у яких практично не перевищують 30. У насадкових апаратах  $We < 5 \dots 8$  і краплі газовим потоком не роздроблюються.

Щоб повніше оцінити стан крапель у газовому середовищі, порівняємо швидкість крапель під час дробіння із швидкістю їх падіння. Швидкість рівномірного падіння (осадження) крапель води у повітрі можна приблизно визначити за відомими формулами [3], що використовуються для твердих сферичних частинок з урахуванням коефіцієнтів опору середовища (газу) залежно від режиму обтікання ним частинок. Для ламінарного режиму обтікання частинок це відома формула Стокса.

Падіння крапель рідини відрізняється від падіння твердих частинок тим, що всередині крапель під дією дотичних напружень суцільної фази може виникати циркуляція рідини, внаслідок чого зменшується відносна швидкість



1. Схема двостадійного дробіння крапель.

Перша стадія:

а — недеформована крапля; б — початкова деформація краплі; в — куполоподібне тіло неправильної форми; г — розрив передньої частини плівки.

Друга стадія:

д — стягування в тор периферійної частини куполоподібного тіла; е — тор і дрібні краплі; ф — розпад тора на більші краплі

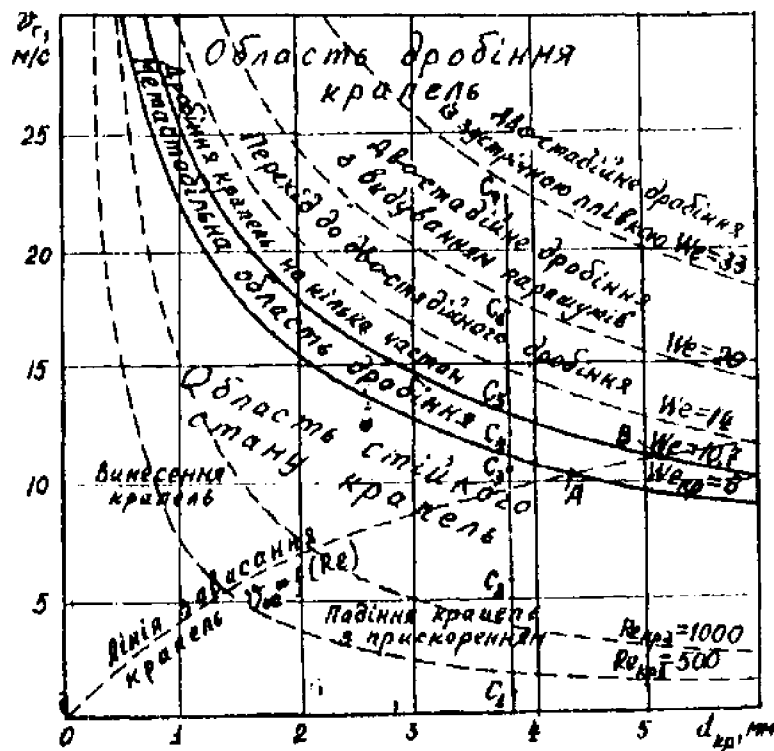
руху фаз на поверхні поділу і має збільшуватися швидкість падіння. Рибчинський і Адамар, виконавши теоретичне розв'язання цієї задачі, показали, що швидкість падіння краплі у в'язкому середовищі має збільшуватися у 1,5 раза порівняно із швидкістю падіння твердих частинок.

Проте досліди ряду експериментаторів показали [2], що краплі малого діаметра в технічно чистих рідинах рухаються за законом Стокса. А.Н. Фрумкін і В.Г. Левич встановили, що це явище пов'язане з дією малих домішок поверхнево-активних речовин. Подібний результат одержала А.В. Городецька для бульбашок великого діаметра [4]. Це дає підставу для приблизного обчислення швидкості падіння крапель у повітрі за формулою для твердих частинок.

Результати обчислення швидкості падіння у повітрі крапель води та відносних швидкостей крапель, що відповідають деформації і дробінню їх при критичних значеннях чисел Вербера, наведено на рис. 2. На діаграмі стану крапель у повітряному потоці по горизонталі відкладено діаметр крапель, а по вертикалі — відносну швидкість повітря. Лінії  $We = const$  на діаграмі визначено за формулою  $We = \rho v^2 d_p / \sigma$  при значеннях густини повітря  $\rho_p = 1,2 \text{ кг/м}^3$  і поверхневого натягу води  $\sigma = 0,0728 \text{ Н/м}$ . Максимальний діаметр крапель  $d_{cr}$  на діаграмі обмежено значенням 0,006 м. Це, за нашими спостереженнями, найбільший діаметр крапель, що утворюються під час стікання рідини із сферичної поверхні у разі збільшення її радіуса до нескінченності.

Лінію  $v_{\infty} = f(Re)$  побудовано за відомими формулами для осадження твердих частинок, вважаючи їхню густину однаковою з густиною води.

Лінія  $Re_{кр} = 500$  характеризує перехід до турбулентного режиму обтікання газом потоком крапель (твердих сферичних частинок).



2. Діаграма стану крапель у повітряному потоці

Лінія  $Re_{кр2}=1000$  відповідає посиленню циркуляції рідини всередині крапель і деформації їх під впливом газового потоку.

Лінії  $We_{кр}=8$  і  $We=10,7$  розділяють діаграму на три області:

- область стійкого стану крапель, яка лежить нижче від лінії  $We_{кр}=8$ ;
- метастабільна область, яка відповідає дробінню крапель на дві частини і лежить у межах  $8,0 \leq We \leq 10,7$ ;
- область дробіння крапель газовим потоком, яка розміщена вище від лінії  $We=10,7$ .

Області стійкого стану і дробіння крапель розділяються на зони.

Лінією зависання крапель  $v_{ос}=f(Re)$  область стійкого стану крапель розділяється на дві зони:

- зона падіння крапель з прискоренням, яка лежить нижче від лінії  $v_{ос}=f(Re)$ ;
- зона винесення крапель газовим потоком, яка лежить вище від лінії  $v_{ос}=f(Re)$ .

Обидві ці зони лінією  $Re_{кр1}=500$  розділяються на підзони з різним характером обтікання крапель газовим потоком. Вище від лінії  $Re_{кр1}=500$  газовий потік обтікає краплі в турбулентному режимі, нижче — у перехідному і ламінарному режимах. Вище від лінії  $Re_{кр2}=1000$  у краплях посилюється циркуляція рідини, краплі деформуються і осцилюють.

Область дробіння крапель лініями  $We=14$  і  $We=20$  розділяється на три зони:

- зона дробіння крапель на декілька близьких за розміром частих, яка лежить у межах  $10,7 \leq We \leq 14,0$ ;
- зона переходу режиму дробіння крапель до двостадійного, яка лежить у межах  $14 \leq We \leq 20$ . У цій зоні режим дробіння змінюється від дробіння на декілька крапель до дробіння на велику кількість дрібних крапель з попереднім утворенням куполоподібного тіла;
- зона двостадійного дробіння, яка лежить вище від лінії  $We=20$ .

У повітряному потоці краплі, не роздроблюючись, можуть перебувати тривалий час в області стійкого існування, що відповідає докритичній деформації їхньої форми при  $We \leq 8$ .

У метастабільній області деформація крапель перевищує критичні значення і краплі розпадаються на дві частини. У цій області можуть бути й основні (незруйновані) краплі, і краплі, що утворилися внаслідок розпаду на дві частини основних крапель. З наближення до лінії  $We=10,7$  кількість крапель, що розпалися на дві частини, збільшується.

Область гарантованого дробіння крапель лежить вище від лінії  $We=10,7$ . Діаметр крапель, що існують у цій області, вже не відповідає значенням, відкладеним на осі абсцис. Можна лише зазначити, який характер буде мати розпад краплі заданого діаметра при її швидкому внесенні в газовий потік.

Діаграма дає змогу простежити стан крапель у газовому потоці залежно від їхнього діаметра і відносної швидкості руху. Наприклад, крапля діаметром 3,87 мм у точці  $C_1$  перебуває у стані падіння з прискоренням, а газовий потік обтікає її при значенні числа Рейнольдса менше ніж 500. У точці  $C_2$  ця крапля падає з прискоренням, але газовий потік обтікає її в турбулентному режимі. Точка  $C_2$  лежить вище від лінії  $Re_{кр2}=1000$ , що свідчить про деформацію краплі в режимі капілярних коливань. У точці  $C_3$  швидкість газового потоку переви-

щує швидкість падіння і крапля підхвачується (виноситься) газовим потоком. Точки  $C_1$ ,  $C_2$  і  $C_3$  лежать вище від лінії  $We_{кр}=8$  в області стійкого стану крапель, і вони не руйнуються газовим потоком. Точка  $C_4$  розміщується в метастабільній області між лініями  $We_{кр}=8$  і  $We=10,7$ . У цій області вірогідне дробіння крапель на дві частини. Точки  $C_5$ ,  $C_6$  і  $C_7$  відповідають швидкостям, які мають краплі у зонах дробіння за різними механізмами. У точці  $C_5$  краплі роздроблюються на декілька близьких за розміром частин. Точка  $C_6$  лежить у зоні переходу до двостадійного дробіння: тут можна очікувати як дробіння крапель на декілька частин, так і двостадійне дробіння на велику кількість дрібних крапель. Точка  $C_7$  лежить у зоні двостадійного дробіння.

Перетин лінії  $v_{ос}=f(Re)$  з лінією  $We_{кр}=8$  дає точку  $A$ , а з лінією  $We=10,7$  — точку  $B$ . Координати, наприклад точки  $A$ , на діаграмі можна розрахувати, виходячи із швидкості падіння частинок (крапель) у турбулентному потоці  $v_k = 5,45 \sqrt{d_k[(\rho_s - \rho_r)/\rho_r]}$ . Підставивши цей вираз у формулу для критерію Вебера (2) при  $We_{кр}=8$ , дістанемо значення діаметра краплі

$$d_k = \sqrt{\frac{8\sigma}{5,45^2(\rho_s - \rho_r)}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 0,0728}{5,45^2 \cdot 998}} = 0,00443 \text{ м}$$

і її швидкості в момент початку дробіння

$$v_k = 5,45 \sqrt{0,00443[(999 - 1,2)/1,2]} = 10,46 \text{ м/с.}$$

Між точками  $A$  і  $B$  лежать швидкості падіння крапель, при яких відносна швидкість газового потоку стає достатньою для критичної деформації і дробіння крапель на дві частини. У точці  $B$  практично всі краплі роздвоєні газовим потоком. Точка  $B$  відповідає розрахунковому діаметру краплі  $d_k=5,1$  мм і відносній швидкості її  $v_k=11,2$  м/с. Це означає, що в разі падіння у нерухомому повітрі (в атмосфері) не можуть існувати у стійкому стані краплі діаметром більше ніж 5,1 мм. Розганяючись під час падіння, вони роздроблюються напором повітря. У колонних апаратах (як і під час дощу) крапель діаметром більше ніж 5 мм не буває, а відносна швидкість руху їх не може перевищувати 11 м/с.

Розміщення на діаграмі лінії  $Re_{кр1}=500$  зліва від лінії  $We_{кр}=8$  свідчить про те, що дробіння завжди відбувається в режимі відривної течії суцільної фази за краплями, коли турбулентні пульсації суцільної фази зумовлюють додаткові коливання, що накладаються на осциляційні коливання крапель. Цей факт свідчить про те, що краплі роздроблюються лише у режимі турбулентної течії газу, а це спричиняє виникнення і розвиток коливань поверхні крапель і прискорює їхній розпад.

Будуючи діаграму, прийняли, що критичне число Вебера  $We_{кр}=8$ , виходячи з чисто теоретичних міркувань. У дійсності розпад крапель є складним явищем, яке не може бути враховане лише одним числом Вебера. Тому різні автори наводять різні значення цих чисел, причому більшість із них дає  $We_{кр}=5 \dots 8$ . Дослідження максимальної швидкості падіння крапель у повітрі дають значення від 8,0 до 9,17 м/с, які менші від одержаного на діаграмі розрахункового значення 11,2 м/с при  $We_{кр}=8$ . Таку розбіжність можна пояснити не тільки багатьма неврахованими факторами, а й різним масштабом тур-

булентних пульсацій газového потоку. У насадкових апаратах масштаб пульсацій сумірний з еквівалентним діаметром насадки і дещо інакше впливає на дробіння крапель порівняно з порожнистими камерами. Наведені на діаграмі параметри дробіння крапель слід розглядати як приблизні.

Користуючись діаграмою, треба мати на увазі, що:

експериментальна лінія записання крапель  $v_{\infty} = f(Re)$  на ділянці  $d_{\kappa} > 2$  мм має лежати дещо нижче від розрахункової внаслідок додаткового гальмування розплющених крапель газівим потоком;

нижня ділянка лінії початку дробіння ( $We_{\kappa p} = 8$ ) у зоні великих крапель ( $d_{\kappa} > 2$  мм) має проходити нижче, а верхня ділянка — вище від теоретично розрахованих значень.

Дробіння крапель емульсій описується тими самими закономірностями, що й дробіння крапель газівим потоком. Дробіння крапель однієї рідини, що рухається в іншій, також є результатом дії на краплю сил динамічного напору рідини  $P_{\Delta p} = \rho_p v_p^2 / 2$  і лапласівського тиску  $P_{\sigma} = 4\sigma / d_{\kappa}$ , тому критичне число Вебера, що відповідає критичній деформації краплі перед дробінням, набуває того самого значення

$$We_p = \rho_p v_p^2 d_{\kappa} / \sigma = 8, \quad (2a)$$

де  $\rho_p$  — густина рідини (суцільної фази), кг/м<sup>3</sup>;  $v_p$  — відносна швидкість руху суцільної фази рідини і краплі, м/с.

Для дробіння крапель потрібно, щоб кінетичної енергії відносного руху їх у стадії деформації вистачило для збільшення поверхневої енергії новостворених крапель. У праці [5] показано, що мінімальному надлишку енергії (близько 1 %) відповідає поділ початкової краплі на дві нерівновеликі частини, відношення об'ємів яких становить приблизно 1:1000 (що дорівнює відношенню діаметрів близько 1:10). Цей випадок є граничним, і в дійсності відношення об'ємів малої та великої крапель, звичайно, більше від цього значення.

Результати швидкісного кінознімання, наведені в праці [6], показують, що якщо відношення осей еліпсоїда, утвореного під час деформації краплі, не перевищує 4:1, то внаслідок дробіння утворюються дві близькі за розміром краплі. У разі більших деформацій еліпсоїд розривається одночасно в кількох місцях.

Кількісна оцінка кінетичної енергії відносного руху краплі показує, що вже при критичному значенні чисел Вебера цієї енергії з надлишком вистачає на створення нової поверхні. Кінетична енергія краплі, що рухається з відносною швидкістю  $v$ ,

$$E_{\kappa} = \frac{mv^2}{2} = \rho \frac{\pi d_{\kappa}^3}{6} \frac{v^2}{2}. \quad (3)$$

Цієї енергії вистачає на збільшення площі поверхні краплі на

$$\Delta s = \frac{E_{\kappa}}{\sigma} = \rho \frac{\pi d_{\kappa}^3}{12\sigma} v^2. \quad (4)$$

Підставивши сюди відносну швидкість  $v^2$  із формули (1), дістанемо

$$\Delta s = \frac{2}{3} \pi d_{\kappa}^2, \quad (5)$$

тобто тієї енергії, яку має крапля на початку деформації (при  $We_{кр} = 8$ ), вистачає для збільшення поверхні краплі на  $2/3$  (на  $67\%$ ) її початкового значення.

Зауважимо, що утворення з однієї краплі  $n$  крапель однакового розміру відповідає збільшенню загальної площі поверхні крапель в  $n^{1/3}$  разів, тобто поділ краплі на 2; 3; 4; 5 однакових частин супроводжується збільшенням загальної поверхні відповідно в 1,26; 1,44; 1,59; 1,71 раза. Під час роздвоєння на створення нової поверхні витрачається  $0,26 \cdot 100 / 0,67 \approx 39\%$  кінетичної енергії краплі. Решта енергії, тобто більша її частина в цьому випадку йде на тертя між шарами рідини і в кінцевому підсумку перетворюється в теплову енергію.

Згідно з рівнянням Ребіндера роботу, потрібну для диспергування конденсованої речовини, можна поділити на дві складові: одна з них витрачається на об'ємну деформацію тіла, друга — на утворення нової поверхні. Оскільки робота об'ємної деформації пропорційна об'єму тіла, то із зменшенням розмірів краплі має зменшуватися робота об'ємної деформації і збільшуватися частка роботи, що витрачається на створення нової поверхні.

В апаратах з мішалками для приготування емульсій числа Вебера  $We_v = n^2 d^2 \rho d_k / \sigma$  звичайно набувають значень на кілька порядків більших, ніж у колонних апаратах системи газ-рідина. Дробіння крапель у них може відбуватися у різних режимах. Практично [7] стійкі розміри крапель (діаметр найменших становить приблизно 0,03 мм) досягаються протягом 5 хв. Режим руху рідини в мішалках завжди турбулентний.

У турбулентних рідких потоках основною причиною дробіння крапель є дрібномасштабні пульсації з неперервним спектром швидкостей і масштабів, серед яких завжди є пульсації масштабів, сумірних з діаметром крапель; ці пульсації і подрібнюють їх. У вирази для чисел Вебера підставляють усереднену швидкість пульсуючого потоку, тому ці числа є статистичною характеристикою процесів дробіння і не можуть бути чітко встановленими.

Аналіз процесів дробіння крапель в апаратах з мішалками [7] показує, що розміри утворених крапель досить добре корелюють із значеннями чисел Вебера за встановленою теоретично залежністю  $d_k \sim We_v^{-0,6}$ , яка підтверджується експериментами.

**Висновки.** Процеси деформації і дробіння крапель як у газовому, так і в рідкому середовищі при невеликих відносних швидкостях фаз можна характеризувати за допомогою чисел Вебера, які набувають близьких значень в обох випадках.

Дробіння крапель завжди відбувається під впливом турбулентних пульсацій із статистичним спектром характеристик, тому числа Вебера, що характеризують режими дробіння, також мають статистичний характер і не можуть бути чітко зафіксованими.

У більшості випадків дробіння утворюються краплі широкого спектра розмірів, причому діаметри найбільших і найменших крапель різняться принаймні на порядок.

Запропоновану діаграму стану водяних крапель у повітряному потоці можна використати для оцінювання гідродинамічної поведінки крапель у тепломасообмінних апаратах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Волынский М.С.* Изучение дробления капель в газовом потоке // ДАН СССР. — 1949. — Т. 68, № 2.
2. *Кутателадзе С.С., Стырикович М.А.* Гидродинамика газожидкостных систем. — М.: Энергия, 1976.
3. *Стабников В.И., Лысянский В.М., Попов В.Д.* Процессы и аппараты пищевых производств. — М.: Агропромиздат, 1985.
4. *Городецкая А.В.* Скорость поднятия пузырьков в воде и водных растворах при больших числах  $Re$  // ЖФК. — 1949. — Т. XXIII, вып. 1.
5. *Кремнев Л.Я., Равдель А.А.* О механизме эмульгирования // Коллоидный журн. — 1954. — № 1.
6. *Sleicher C.A.* Maximum Stable Drop Size in Turbulent Flow // *AJChEJ* — 1962, V.8.
7. *Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабан В.М.* Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. — Л.: Химия, 1984.

*Одержано редколлегиею 10.11.97 г.*