

ISSN 0367-1631

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ОДЕССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. И. И. МЕЧНИКОВА

Физика аэродисперсных систем

ВЫПУСК 41

МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ СБОРНИК

Основан в 1969 г.

Одесса
“Астропринт”
2004

УДК 541.182.2/3:541.126:536.24+66.015.23:533.6

Приведені результати досліджень процесів випаровування, конденсації та коагуляції у водяному аерозолі, а також кінетика горіння твердих і порошкоподібних паливних. Наведено результати досліджень з тепло- і масообміну в дисперсних системах. Висвітлено проблеми активної дії на метеорологічні явища. Розглянуто деякі електричні явища в плазмі продуктів згорання.

Для фізиків, хіміків, метеорологів і інженерів.

Редакционная коллегия:

д-р физ.-мат. наук, проф. **В. В. Калинин** (гл. ред.);
д-р физ.-мат. наук, проф. **С. К. Асланов** (зам. гл. ред.);
д-р физ.-мат. наук, проф. **А. Н. Золотко** (зам. гл. ред.);
д-р физ.-мат. наук, проф. **М. Н. Чесноков** (зам. гл. ред.);
профессор **Анджей Гавдик** (Польша);
д-р физ.-мат. наук, проф. **Г. С. Драган**;
д-р физ.-мат. наук, проф. **А. В. Заговский**;
д-р физ.-мат. наук, проф. **С. М. Контуш**;
академик НАН Украины **Ю. П. Корчевой**;
д-р физ.-мат. наук, проф. **В. Г. Шевчук**;
канд. физ.-мат. наук **Я. И. Вовчук** (секретарь);
канд. физ.-мат. наук, доцент **С. Г. Орловская** (отв. секретарь);
Т. Ф. Смагленко (техн. секретарь)

Адрес редакционной коллегии:

65026, Одесса, ул. Пастера, 27, университет, кафедра теплофизики,
тел. 23-12-03, 23-62-27
<http://www.fas.onu.edu.ua>
E-mail: fas@onu.edu.ua

Редакция при Одесском национальном университете
им. И.И. Мечникова

УДК 66.074.1:547.912

О. О. Ляпощенко, В. І. Склабінський

Сумський державний університет

Механізми формування високодисперсної краплинної рідини у потоці природного газу

Досліджено формування високодисперсної краплинної рідини у потоці природного газу. Розглянуто основні механізми формування крапель рідкої фази, як подрібнення за рахунок інерційних ефектів у турбулентному потоці газу за відсутності конденсації, процеси гетерогенної та гомогенної конденсації, коагуляція за інерційним механізмом та механізмом турбулентної дифузії.

По мірі розробки родовища й руху газу від пласту до сепаратора тиск і температура безупинно змінюються, порушується термодинамічна рівновага всієї двофазної багатокомпонентної системи й відбувається процес масообміну між фазами (конденсація та випаровування). Конденсація призводить до утворення дрібних краплин, розмір яких змінюється за рахунок конденсаційного росту в умовах пересичення та коагуляції, а також подрібнення в турбулентному газовому потоці, які є основними механізмами формування краплі.

У результаті на вході сепаратора встановлюється деякий рівноважний розподіл крапель за розмірами $n(R)$, що має вигляд логнормального розподілу, та характеризується об'ємним вмістом рідкої фази w , середнім радіусом крапель R_c та дисперсією розподілу σ_1^2 .

Основними механізмами формування крапель у турбулентному потоці газу за відсутності конденсації є процеси подрібнення та коагуляції, які відбуваються одночасно. Встановлений визначений розподіл крапель за розмірами має вид логнормального розподілу [1-5]:

$$n(R) = \frac{n_* R_1}{\sigma_1 R} \exp\left(-\frac{\ln^2(R/R_1)}{2\sigma_1^2}\right), \quad (1)$$

$$n_* = 3w \exp(-2,5\sigma_1^2) / 4\pi \sqrt{2\pi} R_c^4, \quad (2)$$

$$R_1 = R_c \exp(-0,5\sigma_1^2), \quad (3)$$

де $n(R)$ — щільність імовірності випадкової величини R ; w — об'ємний вміст рідкої фази; R_c — середній радіус крапель; σ_1^2 — дисперсія розподілу.

Відомо, що краплі в потоці газу подрібнюються, якщо їх радіус перевершує деякий критичний $R_{кр}$ [6]. Краплі радіусом менше критичного можуть тільки коагулювати. У дійсності ці процеси носять випадковий характер. Тому вірніше сказати, що ймовірність подрібнення краплі радіусом менше критичного мала й у якості середнього варто брати критичний радіус. Дійсно, якщо радіус краплі став більше критичного, то вона з більшою ймовірністю подрібниться, з утворенням високодисперсних краплин. Ці, так називані, дочірні краплі коагулюють або між собою, або з іншими краплями доти, поки їх розмір не досягне критичного. Тому сталий радіус крапель — критичний.

Подрібнення краплі в турбулентному потоці газу відбувається за рахунок інерційних ефектів, оскільки щільності краплі й навколишнього їй газу значно відрізняються. Крапля густиною $\rho_{жк}$, зважена в турбулентному газовому потоці густиною $\rho_g \ll \rho_{жк}$, тільки частково захоплює краплю. При цьому газ обтікає частку зі швидкістю [6]:

$$u \approx \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\rho_{жк}}{\rho_g} \right)^{1/3} \left(\frac{\varepsilon}{\rho_g} \right)^{1/3} \left(\frac{V}{S} \right)^{1/3} \left(\frac{2}{K_f} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

де ε — питома дисипація енергії; V та S — об'єм та поперечний перетин краплі; K_f — коефіцієнт опору.

Відповідний цій швидкості динамічний напір [6]:

$$Q = \frac{K_f \rho_g}{2} \left(\frac{\rho_{жк}}{\rho_g} \right)^{2/3} \left(\frac{\varepsilon}{\rho_g} \right)^{2/3} R^{2/3}. \quad (5)$$

Крім динамічного напору Q , обумовленого інерцією частки в газовому потоці, на краплю діє також динамічний напір, обумовлений зміною пульсаційної швидкості по довжині краплі [6]:

$$Q = \frac{K_f \rho_g}{2} \left(\frac{\rho_{жк}}{\rho_g} \right)^{2/3} \left(\frac{\varepsilon}{\rho_g} \right)^{2/3} R^{2/3}, \quad (6)$$

де v_1 та v_2 — ш.видкості газу в крапках, віддалених на відстані $2R$ одна від одної.

Деформацію та подрібнення краплі викликають мілкомасштабні пульсації λ , оскільки крупномасштабні порівняно мало відрізняються на відстані порядку діаметру краплі.

Пульсаційна швидкість v_λ залежить від того, більше чи менше мілкома-
штабні пульсації λ внутрішнього масштабу турбулентності λ_0 [6]:

$$\lambda_0 = \frac{d}{\text{Re}^{3/4}}, \quad (7)$$

де d — діаметр труби; Re — число Рейнольдса.

Має сенс розглядання пульсацій $\lambda > \lambda_0$, для яких

$$v_\lambda = \left(\frac{\varepsilon \lambda}{\rho_e} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

Відношення динамічних напорів

$$\frac{Q}{Q_n} \approx \left(\frac{\rho_{жс}}{\rho_e} \right)^{2/3} \gg 1. \quad (9)$$

Тому $Q \gg Q_n$ та основний вплив в процес подрібнення краплі вносить
динамічний напір.

Умова рівноваги краплі:

$$\frac{0,5 \rho_{жс}^{2/3} \varepsilon^{2/3} R^{2/3}}{\rho_e^{2/3}} = \frac{2\sigma}{R}, \quad (10)$$

виходячи з якої, критичний радіус краплі $R_{кр}$:

$$R_{кр} = d K_f^{-3/5} We^{-3/5} \left(\frac{\rho_e}{\rho_{жс}} \right)^{2/5}, \quad (11)$$

де We — число Вебера.

$$We = \frac{\rho_e u^2 d}{\sigma}, \quad (12)$$

де σ — коефіцієнт поверхневого натягу.

За наявності до сепаратору пристроїв (дросель, теплообмінник, турбо-
детандер), що змінюють температуру та тиск газу, у потоці можливе зарод-
ження дрібних крапельок.

У основі механізму створення рідкої фази за дроселем, розташованим у
підходящій трубі до сепаратору, є процес адіабатичного розширення газо-
вої суміші, за якого одночасно збільшується об'єм суміші, знижується тиск
пари та температура, оскільки робота розширення здійснюється за рахунок

внутрішньої енергії газу. Тиск насиченої пари знижується зі зменшенням температури та призводить до збільшення пересичення пари.

Над випуклою поверхнею, яку мають краплі рідини, тиск насиченої пари вище, ніж над плоскою, та збільшується зі зменшенням радіусу краплі. Тому необхідною умовою конденсації пари у об'ємі газу є наявність пересичення пари.

Процес гомогенної конденсації (утворення крапель відбувається у результаті конденсації пари на мимовільно створюючихся зародках) складається з трьох стадій: утворення пересиченої пари, створення зародків, конденсації пари на поверхні зародків та їх зростання. Конденсація пари в об'ємі починається лише за визначеного критичного пересичення $s_{кр}$ [6]:

$$s_{кр} = \exp\left(1,74 \cdot 10^7 \frac{M_{жс}}{\rho_{жс}} \left(\frac{\sigma}{T}\right)^{3/2}\right), \quad (13)$$

де $M_{жс}$ — молекулярна маса пари; $\rho_{жс}$ — густина рідини.

Процес гетерогенної конденсації (утворення крапель відбувається на ядрах конденсації) відбувається за наявності ядер конденсації. Якщо ядрами є дрібні краплі, то за встановлення рівноваги на поверхні краплі має місце формула Кельвіна [6]:

$$\ln s = \frac{2\sigma M_{жс}}{AT\rho_{жс}R}, \quad (14)$$

де A — газова постійна; R — радіус краплі.

За гомогенної конденсації у газовій суміші під тиском, більшим тиску насичення, з'являються зародки рідкої фази, які потім збільшуються за розмірами. Швидкість утворення зародків можливо оцінити формулою Френкеля [6]:

$$I = 1,82 \cdot 10^{26} \frac{\alpha}{s\rho_{жс}} \left(\frac{p}{T}\right)^2 (M_{жс}\sigma)^{1/2} \exp\left(-1,76 \cdot 10^{16} (\ln s)^2 \frac{M_{жс}^2 \sigma^3}{\rho_{жс}^2 T^3}\right), \quad (15)$$

де α — коефіцієнт конденсації, що виражає долю молекул пари, які вдарились о поверхню рідини та залишилися на ній.

Необхідною умовою утворення конденсованої фази є наявність таких процесів, за яких підвищується пересичення суміші, наприклад, у результаті зниження температури суміші або підвищення тиску газу. Конденсація призводить до збільшення температури суміші та вирівнювання парціальних тисків пари у поверхні крапель та на відстані від них. Це зменшує пересичення і в кінцевому рахунку призводить до призупинення утворення зародків. Швидкість процесу конденсації на поверхні краплі визначається дифузиею

пари до цієї поверхні, тому за великих значень швидкості пересичення ds/dt швидкість дифузії може статися недостатньою для вирівнювання тиску пари в усьому об'ємі. При цьому тиск пари у поверхні крапель може сильно відрізнятися від тиску пари в об'ємі. Виникає значне пересичення, що призводить до інтенсивного зародкоутворення.

Таким чином, в залежності від співвідношення між швидкістю пересичення та чисельною концентрацією крапельок (ядер конденсації) можливі два випадки: швидкість дифузії пари до поверхні краплі значна, і пересичення не досягає критичного значення, тому зародки не утворюються; швидкість дифузії пари незначна, пересичення становиться більш критичного та відбувається інтенсивне зародкоутворення.

Вводячи розподіл крапель $n(V,t,P)$ за об'ємами V у момент часу t у крапці P , зміст якого полягає в тому, що ndV — кількість крапель, об'єм яких обмежений інтервалом $(V, V+dV)$, рахункова N та об'ємна w концентрації краплин відповідно дорівнюють:

$$N = \int_0^{\infty} ndV, \quad (16)$$

$$w = \int_0^{\infty} VndV. \quad (17)$$

У основу коагуляції за інерційним механізмом полягає уявлення що турбулентні пульсації не повністю заволакують частку. У результаті відносні швидкості, здобувані краплями за рахунок турбулентних пульсацій, залежать від маси крапель. Різниця пульсаційних швидкостей крапель різноманітного радіусу обумовлює їх зближення та підвищує вірогідність зіткнення. У основу коагуляції за механізмом турбулентної дифузії полягає уявлення про повне збільшення часток турбулентними пульсаціями того масштабу, який відіграє основну роль у механізмі зближення часток. Оскільки частки хаотично рухаються під дією турбулентних пульсацій, то їх рух схожий з уявленням дифузії та може бути охарактеризований турбулентним коефіцієнтом дифузії.

Відомо, що $n(V,t,P)$ задовольняє кінетичному рівнянню [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial t} + \bar{u}\nabla n + \frac{\partial}{\partial V} \left(n \frac{dV}{dt} \right) = & \frac{1}{2} \int_0^V K(W, V-W) n(W, t, P) n(V-W, t, P) dW - \\ & - n(V, t, P) \int_0^{\infty} K(V, W) n(W, t, P) dW + \\ & + \int_V^{\infty} f(W, V) g(W) n(W, t, P) dW - n(V, t, P) g(V) + i \end{aligned} \quad (18)$$

де \bar{u} — швидкість краплі об'єму V ; dV/dt — швидкість зміни об'єму крапель у процесі конденсації або випаровування; i — інтенсивність зародження но-

вої фази за конденсації, так що $\int_0^{\infty} i dV = N_0$.

Входячі до рівняння (18) $f(V,W)$ мають зміст кількості краплин, утворених за подрібнення краплі об'єму V ; $g(V)$ — вірогідність подрібнення краплі об'єму об'єму V , а ядро коагуляції $K(W,V)$ визначається у результаті досліджень взаємодії краплин. Оскільки подібна взаємодія ускладнена впливом зовнішнього середовища, характером взаємодії у ламінарному та турбулентному потоці, а також силовими полями (гравітацією, молекулярною взаємодією), то визначення ядра коагуляції являє самостійну задачу. Зрозуміло, що $K(W,V)$ пропорційно вірогідності зіткнення краплин об'ємом W та V . Перші два складники правої частини рівняння (18) обумовлені розподілом $n(V,t,P)$ за рахунок коагуляції, а наступні два — за рахунок подрібнення крапель.

Звичайно, процеси подрібнення та коагуляції краплин йдуть одночасно та залежать від режиму течії.

У ламінарному потоці коагуляція обумовлена зближенням краплин за рахунок різних швидкостей осадження та подальшої їх коалесценції. При цьому величина $K(W,V)$ пропорційна перетину захоплення краплею об'єму V крапель об'єму W . Подрібнення в ламінарному потоці може відбуватися за рахунок суттєвого градієнта швидкості, деформуючого краплю. За ламінарної течії газу значних градієнтів швидкості немає, тому подрібнення дрібних крапель у ламінарному потоці практично відсутнє.

У турбулентному потоці зближення крапель відбувається за рахунок хаотичних турбулентних пульсацій. У результаті, порівняно з ламінарним потоком, кількість зіткнень за одиницю часу збільшується. Будь-яке, навіть незначне перемішування потоку призводить до збільшення кількості зіткнень. Що стосується подрібнення, то у відповідності до формули (11) радіус крапель, що належать подрібненню, зворотно пропорційний швидкості потоку.

3D геометрична модель захищеної патентами України [7-8] конструкції інерційно-фільтруючого газосепаратора для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газового потоку створена за допомогою САПР КОМПАС-3D V6 Plus, після чого за допомогою програмного продукту COSMOS FlowWorks 2004 CAD-системи SolidWorks 2004, а також програмного комплексу FlowVision 2003, проводяться комплексні спроби моделювання пливу двофазного потоку природного газу в створеній геометричній конфігурації розрахункової області сепараційного каналу.

Література

1. Склабинский В.И., Стороженко В.Я., Смирнов В.А., Ляпощенко А.А. Анализ технологической схемы и работы оборудования установки осушки природного газа и узла сепарации // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2003. — №6. — с. 70-75.
2. О.О.Ляпощенко, В.І.Склабінський. Високоєфективне інерційно-фільтруюче газосепараційне обладнання у нафтогазовій промисловості // Проблеми економії енергії: Збірник матеріалів ІV Міжнародної науково-практичної конференції. — Львів, 2003. — с. 106-107.
3. О.О.Ляпощенко, В.І.Склабінський. Підвищення ефективності сепараційного устаткування компресорних установок нафтогазової промисловості // Компрессорная техника и пневматика в XXI веке. Труды XIII Международной научно-технической конференции по компрессоростроению. — Сумы, 2004. — с. 267-277.
4. О.О.Ляпощенко, В.Ы.Склабінський. Механізми формування високодисперсної краплинної рідини у потоці природного газу // Дисперсные системы. Тезисы докладов XXI научной конференции стран СНГ. — Одесса, 2004. — с. 203-204.
5. В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко. Підвищення ступеня утилізації побіжного нафтового та природного газів шляхом застосування високоєфективного газосепараційного устаткування // Вісник Сумського державного університету. — 2004. — №2(61). — с. 65-69.
6. Э.Г.Синайский. Разделение двухфазных многокомпонентных смесей в нефтегазопромысловом оборудовании. — М.: Недра, 1990.— 272 с., ил.
7. Деклараційний патент на винахід України № 60782 А, МПК 7 В01D45/04. Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку і пристрій для його здійснення / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко. — Бюл. № 10, 15.10.2003.
8. Деклараційний патент на винахід України № 69701 А, МПК 7 В01D45/04. Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку і пристрій для його здійснення / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко. — Бюл. № 9, 15.09.2004.

А. А. Ляпощенко, В. И. Склабинский

**Механизмы формирования высокодисперсной капельной жидкости
в потоке природного газа**

АННОТАЦИЯ

Исследовано формирование высокодисперсной капельной жидкости в потоке природного газа. Рассмотрены основные механизмы формирования капель жидкой фазы, как измельчение за счет инерционных эффектов в турбулентном потоке газа при отсутствии конденсации, процессы гетерогенной и гомогенной конденсации, коагуляция по инерционному механизму и механизму турбулентной диффузии.

Lyaposchenko A. A., Sklabinskij V. I.

**MECHANISMS OF FORMATION IT IS HIGH A DISPERSE DROP
LIQUID IN A STREAM OF NATURAL GAS**

SUMMARY

Formation highly a disperse drop liquid in a stream of natural gas is investigated. The basic mechanisms of formation of drops of a liquid phase, as crushing are considered due to ratchet effects in a turbulent stream of gas at absence of condensation, processes of heterogeneous and homogeneous condensation, coagulation on the inertial mechanism and the mechanism of turbulent diffusion.