УДК 66.074.51

О.М. ПІДВИСОЦЬКИЙ, канд. техн. наук, **В.В. ДУБРОВСЬКИЙ**, канд. техн. наук,
О.А. ШРАЙБЕР, д-р техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України, м. Київ

УЗАГАЛЬНЕННЯ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ ЩОДО ЕФЕКТИВНОСТІ УЛОВЛЮВАННЯ ЧАСТИНОК ЗОЛИ КРАПЛЯМИ СТОСОВНО ПРОЦЕСУ МОКРОЇ ОЧИСТКИ ДИМОВИХ ГАЗІВ

Експериментально досліджено процес коагуляції твердих частинок і крапель на різних режимах їх динамічної взаємодії. Виявлено вплив різних факторів на ефективність уловлювання частинок. Отримані дослідні дані проаналізовано та узагальнено у вигляді безрозмірної формули.

Ключові слова: мокра очистка димових газів, краплі, тверді частинки, параметр коагуляції.

Удосконалення очистки димових газів пиловугільних котлів від леткої золи є актуальною задачею сучасної енергетичної науки. У процесі мокрої очистки, який широко використовується в енергетиці України, основним моментом є явище коагуляції твердих частинок із краплями, яке до теперішнього часу було досліджено вкрай недостатньо і потребує детального вивчення. Метою цієї роботи і є дослідження процесу коагуляції на різних режимах динамічної взаємодії частинок і крапель, аналіз та узагальнення результатів, а також висновки щодо можливостей покращання ефективності уловлювання.

Явище взаємодії частинок із краплями настільки складне, що використання аналітичних або навіть числових методів його вивчення неможливе. Тому було проведено модельні експериментальні дослідження взаємодії частинок піску, які несе потік повітря, з вільно падаючими краплями води або водогліцеринових розчинів, і визначався параметр коагуляції Ψ_{ji} [1], який характеризує матеріальний баланс процесу уловлювання. Дослідження проводились з урахуванням відповідності модельних процесів реальним, що мають місце в апаратах для мокрої очистки димових газів від леткої золи.

© О.М. ПІДВИСОЦЬКИЙ, В.В. ДУБРОВСЬКИЙ,
О.А. ШРАЙБЕР, 2012

Проведення дослідів. В експериментах використовували чотири вузькі фракції частинок піску із середніми розмірами Δ_j: 380, 230, 150 і 90 мкм. Діаметр δ_i монодисперсних крапель рідини в експериментах становив від 3 до 5 мм.

Двофазовий потік (повітря з твердими частинками), який моделював течію димових газів пиловугільних котлів, утворювався на установці за допомогою змішувача ежекційного типу, в якому до чистого повітря підмішувались частинки піску певного розміру. Частинки, які падали із бункера під дією ваги у змішувач, підсмоктувались струменем повітря і розганялись в каналі-соплі. Докладно експериментальну установку описано в [1].

Потік чистого повітря створювався за допомогою компресора. Швидкість u_a потоку, що переносив частинки, регулювалась за рахунок зміни його витрати G, яка визначалась за допомогою ротаметра. В дослідах швидкість потоку повітря не перевищувала рівня, за якого його дія могла істотно деформувати або руйнувати краплі, і становила від 8 до 11,9 м/с на зрізі сопла.

Швидкість твердих частинок u_p в потоці повітря визначалась з урахуванням їх ковзання у двофазовому потоці. Розрахунки швидкості u_p проводились для точки зіткнення твердих частинок із краплею, відстань якої від точки попадання частинки в потік повітря ста-

новила 130 мм. При цьому використовувались рівняння:

$$\frac{du_p}{d\tau} = \frac{3C\rho_a\left(u_a - u_p\right)^2}{4\rho_p\Delta}; \quad \frac{dx}{d\tau} = u_p, \quad (1)$$

де коефіцієнт аеродинамічного опору $C = 4{,}36 / \mathrm{Re}^{0{,}2}$ при $20 < \mathrm{Re} < 800$; число $\mathrm{Re} = \left|u_a - u_p\right|\Delta / \nu$; коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря $\nu = 1{,}5 \cdot 10^{-5}$ м^2/с; його густина $\rho_a = 1{,}18$ кг/м^3; густина частинок піску $\rho_p = 2700$ кг/м^3.

Числове інтегрування рівнянь (1) було виконано за допомогою програми, реалізованої у середовищі Turbo Basic. Було зроблено припущення, що на дільниці між зрізом сопла та точкою зіткнення частинок піску з краплями розширення потоку слабо впливає на результати розрахунків.

Крім того, методом стробоскопічної візуалізації вимірювалась швидкість u_i падіння крапель. Швидкість визначалась за частотою спалахів імпульсної лампи та відстанню між «нерухомими» зображеннями крапель в області їх взаємодії з частинками.

Відносна швидкість u_{ji} крапель і твердих частинок визначалась за формулою $|u_{ji}| = (u_p^2 + u_i^2)^{0{,}5}$. В дослідах вона становила від 3,6 до 8,3 м/с.

На рис. 1 показано, як залежить швидкість частинок піску від їх розміру та швидкості повітря. Зменшення u_a приводить, природно, до зниження швидкості частинок. Дрібні частинки захоплюються повітрям краще, і їх швидкість наближається до швидкості газу, тоді як крупні фракції помітно відстають від нього.

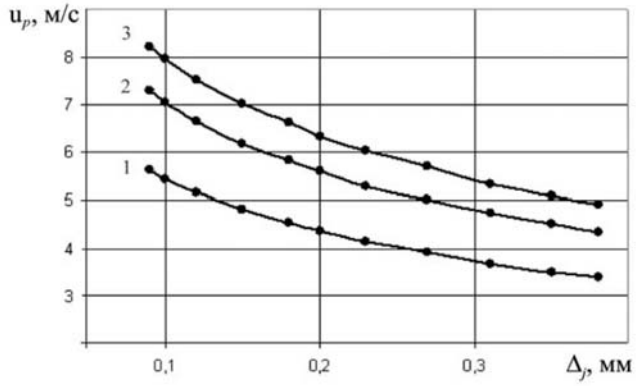

Рис. 1. Вплив розмірів твердих частинок на їх швидкість у двофазовому потоці: *1* – u_a = 8 м/с; *2* – 10,4; *3* – 11,9

У процесі досліду краплі перетинали потік повітря з твердими частинками і взаємодіяли з ними. Маса частинок, що зіштовхувалась із краплями за час досліду, визначалась ваговим методом. Для цього у досліді брали порцію частинок певної маси, яка у складі двофазового струменя вилітала з сопла і уловлювалась спеціальним пристроєм. Якщо краплі не перетинали потік, уловлювалась вся порція частинок, що вилітала. Якщо ж взаємодія крапель із двофазовим потоком мала місце, то в пристрій для уловлювання попадали не всі частинки, а тільки ті, що не зіштовхнулися з краплями. В результаті зіткнень певна маса частинок коагулювала з краплями, а деякі частинки відскакували від них, втрачали свою швидкість і не потрапляли в уловлювач. Таким чином, по різниці уловлених мас без падіння крапель та з їх падінням (при незмінній порції частинок у двофазовому потоці) визначалась маса m_a твердих частинок, що взаємодіяли з краплями за час досліду.

Краплі з захопленими частинками піску збирались в окремому уловлювачі. Після фільтрування та випаровування з них рідини визначалась маса m_c твердих частинок, що коагулювала з краплями за час досліду. На основі виконаних вимірювань обчислювався параметр коагуляції $\Psi_{ji} = m_c / m_a$. Методика експериментального дослідження докладно викладена в [1].

Результати досліджень. Встановлено, що практично завжди картина динамічної взаємодії твердих частинок з краплями далека від повної коагуляції – певна кількість частинок рикошетує від поверхні крапель (переважно при дотичних зіткненнях), а деякі частинки пострілюють їх і при цьому вибивають із крапель якусь масу рідини. Було проведено спеціальні досліди з вивчення таких типів зіткнень. Частинки, які не коагулювали з краплями і у той самий час не попадали в уловлювач двофазового потоку, осідали на скляній пластині або на папері. Там було виявлено сліди рідини, яку принесли з собою частинки, але в умовах експерименту ці сліди інтенсивно випаровувались, і у зв'язку з цим не вдалося визначити їх масу. Оцінки, отримані на основі візуального спостереження, свідчать про те, що відношення маси рідини, що вибилась із краплі, до маси твердих частинок, які не коагулювали з нею, досить мале (у першому наближенні 0,1).

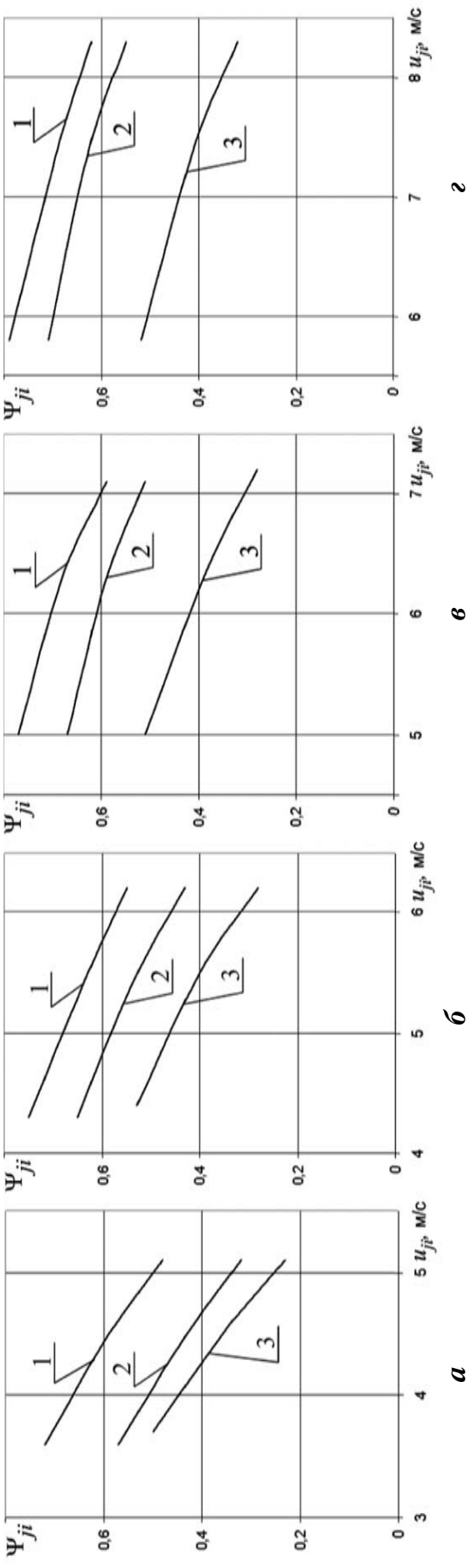

Рис. 2. Залежність параметра коагуляції від відносної швидкості твердих частинок та крапель: розмір частинок: $a - \Delta_j = 0{,}38$ мм; $б - 0{,}23$; $в - 0{,}15$; $г - 0{,}09$; діаметр крапель: $1 - \delta_i = 5$ мм; $2 - 4$; $3 - 3$

Рис. 3. Вплив розмірів крапель на параметр коагуляції: розмір частинок: $a - \Delta_j = 0{,}38$ мм; $б - 0{,}23$; $в - 0{,}15$; $г - 0{,}09$; відносна швидкість: *(а)* $1 - u_{ji} = 3{,}65$ м/с; $2 - 4{,}55$; $3 - 5{,}1$; *(б)* $1 - 4{,}35$ м/с; $2 - 5{,}45$; $3 - 6{,}2$; *(в)* $1 - 5$ м/с; $2 - 6{,}35$; $3 - 7{,}15$; *(г)* $1 - 5{,}8$ м/с; $2 - 7{,}4$; $3 - 8{,}3$

У цілому було проведено 65 серій експериментів, кожний з яких складався з 3 – 4 окремих дослідів.

Досліди надали можливість визначити вплив розмірів крапель і частинок, їх відносної швидкості та властивостей рідини на параметр коагуляції Ψ_{ji}.

На рис. 2 проілюстровано залежність параметра Ψ_{ji} від відносної швидкості твердих частинок та крапель води. Для всіх розмірів частинок збільшення швидкості взаємодії та зменшення розміру краплі приводить до зменшення параметра коагуляції. З рис. 2 видно, що з ростом розміру твердих частинок вплив відносної швидкості на параметр Ψ_{ji} дещо посилюється.

На рис. 3 показано, як впливає розмір краплі води на параметр Ψ_{ji}. Зі збільшенням діаметра крапель та зменшенням відносної швидкості параметр коагуляції зростає на всіх режимах взаємодії. Відзначимо, що характер залежностей $\Psi_{ji} = \Psi_{ji}(\delta_i)$ змінюється зі зменшенням розміру твердих частинок Δ_j. Так, для крупних частинок похідна $d^2\Psi_{ji}/d\delta_i^2$ позитивна, і криві з ростом δ_i стають більш крутими (рис. 3, *а*). Для більш дрібних частинок величина негативна, і криві стають більш пологими при зростанні δ_i (рис. 3, *б – г*).

На рис. 4 продемонстровано залежність параметра коагуляції від розміру твердих частинок при однаковій відносній швидкості взаємодії. Досліди показали, що збільшення розміру фракції приводить до стрімкого зниження величини Ψ_{ji}.

Одним із основних параметрів, який впливає на ймовірність коагуляції частинок з краплею, є величина кінетичної енергії твердої частинки $E = m_p u_p^2 / 2$ (m_p – маса частинки). Природно, більш крупні частинки мають більшу енергію. Нехай δ_i = 5 мм, а відносна швидкість взаємодії u_{ji} = 5 м/с. Якщо з краплею зіштовхується крупна частинка з середнім розміром Δ_j = 0,38 мм і достатньо великою кінетичною енергією, параметр коагуляції становить 0,5 – отже, половина частинок рикошетує від краплі або пролітає по хорді крізь неї (рис. 4 і 2, *а*). Якщо з краплею з тією самою швидкістю зіштовхується менша фракція частинок (Δ_j = 0,23 мм) з меншою кінетичною енергією, то процес уловлювання покращується, і параметр коагуляції зростає до 0,67 (рис. 4 і 2, *б*). Ще менші частинки (Δ_j = 0,15 мм) за тих самих умов взаємодії дають параметр коагуляції 0,77 (рис. 4 і 2, *в*). Енергії частинок навіть цієї фракції вистачає, щоб проникнути у краплю, але покинути краплю частинці ще трудніше.

З метою розширення діапазону визначальних чисел подібності, які описують процес коагуляції, було проведено також низку дослідів з використанням в'язких крапель водогліцеринових розчинів з різними концентраціями гліцерину (до 85 %). При максимальній концентрації коефіцієнт динамічної в'язкості η_l крапель більш ніж на два порядки перевищує відповідну величину для води. Під час проведення дослідів візуальне спостереження зіткнень твердих частинок із краплями в'язкої і нев'язкої рідини у неперервному та імпульсному освітленні показало, що якісна картина процесу взаємодії мало відрізняється, але ефективність уловлювання різна.

На рис. 5 показано виявлений з експериментів вплив в'язкості крапель на параметр коагуляції. Крива 1 відповідає середньому розміру частинок Δ_j = 0,38 мм, діаметру крапель δ_i = 4,6 мм, їх відносній швидкості u_{ji} = 5,1 м/с, крива 2 – Δ_j = 0,23 мм, δ_i = 4,9 мм, u_{ji} = 4,4 м/с. В усіх випадках зі збільшенням в'язкості рідини параметр коагуляції зростає. Для дрібних частинок (крива 2), які краще коагулюють з краплями, ступінь зростання параметра Ψ_{ji} дещо менший, ніж для частинок більшого розміру (крива 1). Характер цих залежностей, головним чином, можна пояснити співвідношенням між роботою сил в'язкості і кінетичною енергією частинок.

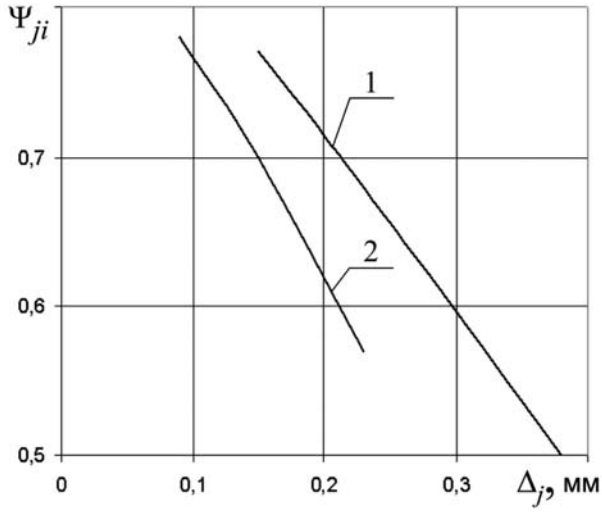

Рис. 4. Залежність параметра коагуляції від розмірів твердих частинок: δ_i = 5 мм; *1* – u_{ji} = 5 м/с; *2* – 6

ISSN 1562-8965. Проблеми загальної енергетики, 2012, вип. 2 (29)

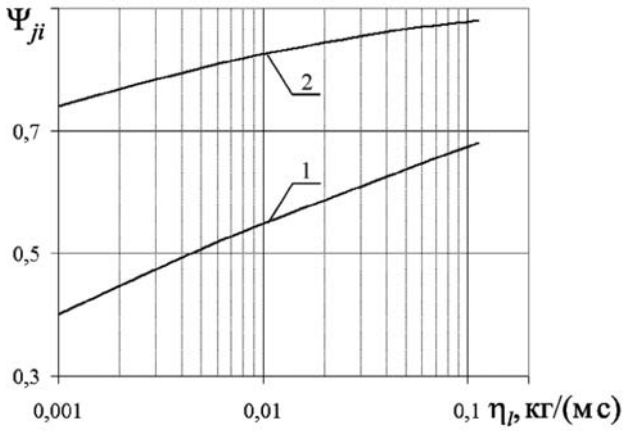

Рис. 5. Залежність параметра Ψ_{ji} від в'язкості крапель

Узагальнення результатів досліджень. Для узагальнення дослідних даних було випробувано різні варіанти їх обробки. В результаті було вибрано такі безрозмірні параметри: число Рейнольдса, що відповідає руху частинки всередині краплі, $\mathrm{Re}_{ji} = \Delta_j u_{ji} \rho_l / \eta_l$, число Лапласа $\mathrm{Lp}_i = \delta_i \rho_l \sigma / \eta_l^{\,2}$ та b/Δ_j. Тут $b = [\sigma/(g(\rho_l - \rho_g))]^{0,5}$ – капілярна стала; σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини; ρ_l, ρ_g – густина рідини та газу; g – прискорення сили тяжіння.

У результаті обробки даних методом найменших квадратів у середовищі Turbo Basic за допомогою спеціально розробленої програми було отримано узагальнюючу формулу:

$$\Psi_{ji} = 1 - 0{,}00317 \mathrm{Re}_{ji}^{\,1,77} \mathrm{Lp}_i^{\,-0,80} (b/\Delta_j) \qquad (2)$$

при $15 \le \mathrm{Re}_{ji} \le 1940$; $28 \le \mathrm{Lp}_i \le 370000$; $6{,}02 \le b/\Delta_j \le 30{,}6$.

Необхідно відзначити, що організувати експеримент у всій зазначеній прямокутній області значень Re_{ji} та Lp_i дуже складно (якщо взагалі можливо). Зокрема, у зв'язку з тим, що коефіцієнт динамічної в'язкості фігурує як у числі Re_{ji}, так і в Lp_i, не вдається провести експеримент, наприклад, при великих числах Lp_i та малих значеннях чисел Re_{ji}. Тобто неможливо забезпечити відповідні значення розмірів твердих частинок, крапель та відносної швидкості їх взаємодії, з якими можна було б реально працювати на експериментальній установці.

На рис. 6 у координатах $\mathrm{Re}_{ji} - \mathrm{Lp}_i$ показано область, у якій були виконані експерименти. Верхня границя цієї області може бути описана залежністю:

$$\mathrm{Lp}_i = 0{,}054\ \mathrm{Re}_{ji}^{\,2,57},$$

а нижня –

$$\mathrm{Lp}_i = 0{,}053\ \mathrm{Re}_{ji}^{\,2,02}.$$

На рис. 7 показано, як значення параметра коагуляції Ψ_{ji}, розраховані за емпіричною формулою (2), узгоджуються з даними, отриманими з експерименту. Розрахунки показали, що найбільше відхилення дослідних даних від обчисле-

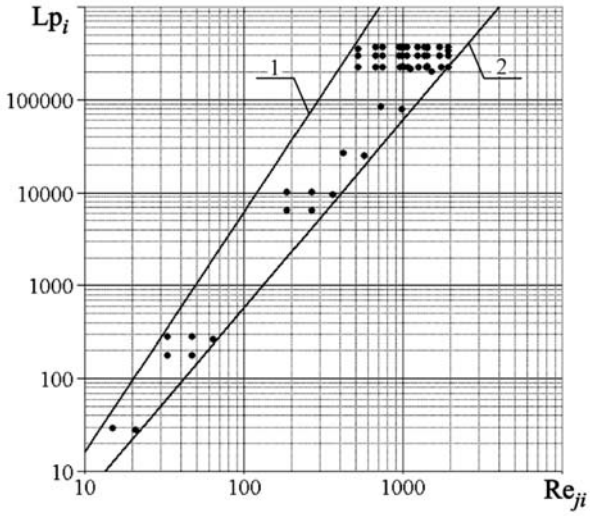

Рис. 6. Область чисел Re_{ji} та Lp_i, в якій було проведено експерименти: 1 – верхня границя; 2 – нижня границя

них за залежністю (2) не перевищує 0,06, а середньоквадратичне відхилення становить 0,035. Отримана узагальнююча залежність надає можливість замкнути побудовану раніше [2] систему рівнянь математичної моделі процесу мокрої очистки газів від твердих частинок.

З емпіричної формули (2) можна визначити вплив розмірних величин на параметр коагуляції:

$$\Psi_{ji} = f(u_{ji}^{\,1,77} \Delta_j^{\,0,77} \rho_l^{\,0,97} b \delta_i^{\,-0,8} \eta_l^{\,-0,17} \sigma^{-0,8}).$$

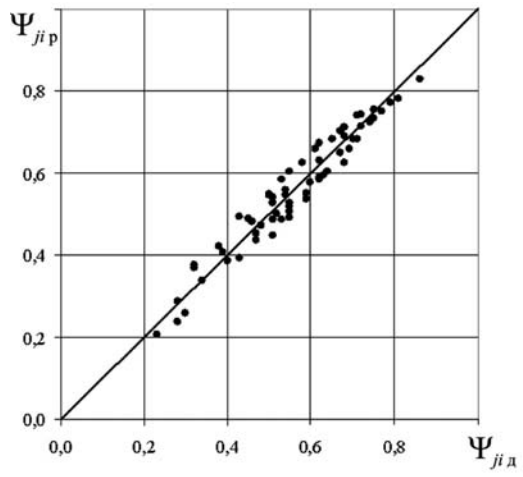

Рис. 7. Зіставлення розрахункових ($\Psi_{ji\ \mathrm{p}}$) та дослідних ($\Psi_{ji\ \mathrm{д}}$) даних

Найбільший вплив на параметр Ψ_{ji} чинить відносна швидкість взаємодіючих частинок. Залежно від кінетичної енергії частинки після зіткнення з краплею вона може рикошетувати від неї, прострелити краплю або коагулювати з нею. Найменший вплив, як показали проведені досліди, чинять сили в'язкості рідини.

На рис. 8 у тривимірному просторі показано вплив числа Re_{ji} та відношення Δ_j/b на параметр коагуляції твердих частинок із краплями (для побудови залежності симплекс b/Δ_j, що фігурує у формулі (2), замінено на обернену величину). Поверхня на рисунку, яка відображена у градаціях сірого, відповідає числу $\mathrm{Lp}_i \approx 220000$, а поверхня, показана у вигляді прозорої сітки, – $\mathrm{Lp}_i \approx 370000$. При фіксованому значенні числа Лапласа та відношення Δ_j/b збільшення числа Re_{ji} приводить до зменшення параметра коагуляції.

ВИСНОВКИ

Проведено широкі експериментальні дослідження коагуляції твердих частинок із краплями при їх динамічній взаємодії стосовно робочого процесу в апаратах для мокрої очистки димових газів. Виявлено вплив режимних параметрів та в'язкості рідини на ефективність уловлювання частинок.

Отримані дослідні дані проаналізовано та узагальнено у вигляді безрозмірної формули. Використання цієї формули у числових розрахунках апаратів для мокрої очистки димових газів пиловугільних котлів надасть можливість покращити процес уловлювання краплями частинок золи.

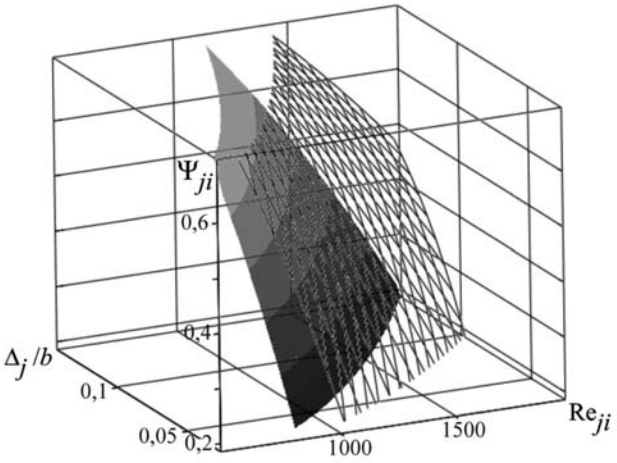

Рис. 8. Залежність параметра Ψ_{ji} від чисел подібності Re_{ji} та Δ_j/b

Робота виконана за підтримки НАН України (спільний проект № 07-08-12 (У) НАН України та Російського фонду фундаментальних досліджень).

1. Дубровський В. В., Підвисоцький О. М., Шрайбер О. А. До визначення ефективності уловлювання частинок леткої золи краплями // Проблеми загальної енергетики. – 2011. – № 26. – С. 45–49.

2. Шрайбер О. А., Федінчик І. В. Моделювання процесу мокрої очистки димових газів від леткої золи // Пром. теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 3. – С. 86–92.

Надійшла до редакції 13.06.2012