

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОЇ ВИТРАТИ ПОВІТРЯ В ПНЕВМОМЕХАНІЧНОМУ ОБПРИСКУВАЧІ

В пневмомеханічному обприскувачі, коли робоча рідина дозується і транспортується до розпилювачів повітряним потоком, можливе існування руху рідини, напрямок якого не співпадає з рухом повітряного потоку, при цьому загальний рух повітряно-рідинної суміші переходить в снарядно-кільцевий і снарядний, що призводить до виникнення пульсації робочої рідини. В статті визначена така витрата повітря, при якій напрямки руху робочої рідини і повітря завжди співпадають.

В ННЦ “Інститут механізації та електрифікації сільського господарства” УААН розроблений пневмомеханічний малооб’ємний

обприскувач з пневматичним осадженням краплин, дискові розпилювачі якого здійснюють дрібнокраплинний розпил робочої рідини з дисперсністю 90...240 мкм ММД і мають показник полідисперсності 1,6–2,52, що в 2...3 рази менший порівняно з гідравлічними розпилювачами, і практично повністю виключаються витрати пестицидів від скочування краплин з листків на землю, а отже, значно підвищується ефективність їх використання. Він об'єднує в собі переваги малооб'ємних обприскувачів і обприскувачів з примусовим осадженням краплин. В пневмомеханічному обприскувачі застосовується пневматичне осадження краплин, яке виключає втрати робочої рідини від випаровування і знесення вітром мілкодисперсних краплин. При обприскуванні польових культур пневмомеханічним обприскувачем з'являється можливість працювати на протязі робочої зміни з однією заправкою бака робочою рідиною, оскільки цей обприскувач дозволяє використовувати малі норми внесення робочої рідини, що зменшує витрати паливо-мастильних матеріалів і трудових ресурсів. В пневмомеханічному обприскувачі витрата рідини має становити 5...50 л/га, а то і менше, а це значить, що окрім того, що витрата рідини дуже мала, вона ще повинна й регулюватись у відносно великих межах, тобто змінюватись більше ніж у 10 разів. Отже, постає питання надійного дозування робочої рідини в пневмомеханічному обприскувачі [1].

Відомо, що на величину та знак витрати рідини при вертикальному висхідному русі повітряно-рідинної суміші впливають витрата повітря, діаметр труби, відносний об'ємний вологовміст і кут нахилу труби. Із збільшенням витрати повітря, відносного об'ємного вологовмісту і зменшенням діаметра труби, витрата рідини збільшується. Якщо в трубу вводити рідину при відсутності подачі повітря з нижньої кромки труби, вся рідина буде стікати по стінках труби з певною витратою. При менших діаметрах труби низхідна витрата рідини буде меншою при однакових $1-\alpha$, причому незначна зміна діаметра труби призводить до значної зміни низхідної витрати рідини. Якщо із нижньої кромки труби немає відведення рідини, вона буде там накопичуватись, доки не перекриє весь переріз труби і рух повітряно-рідинної суміші перейде в снарядний режим. Якщо починати подавати з нижньої частини труб повітря, швидкість руху стікаючої плівки рідини дещо вповільниться. Плівка рідини, що стікає, вже не буде однорідною: вона буде представляти собою тонкий висхідний прошарок, що рухається по товстому шару плівки. При збільшенні витрати повітря висхідний шар плівки буде збільшуватись, на поверхні його будуть з'являтися хвилі збурення. Загальний опускний рух плівки рідини буде все повільнішим. При певній граничній витраті повітря $Q_{n. \text{ гр. пов.}}$ настане такий момент, коли не буде рухатись ні вниз, ні вгору, а як би "застигне" на місці. Буде спостерігатись явище "захливання". При цьому на поверхні плівки рідини будуть спостерігатись великі хвилі збурення, які можуть

досягати таких розмірів, що повністю перекриватимуть переріз труби.

Загальний рух суміші буде нестійким, будуть спостерігатись великі пульсації тиску і витрати повітря. Для різних витрат рідини, діаметра трубопроводу і відносного об'ємного вологовмісту $Q_{п. гр. пов}$ має різні значення. При подальшому збільшенні витрати повітря спочатку частина, а потім і вся рідина почне рухатись вгору, рух рідини знову стане ламінарним. Відбудеться “поворот потоку”. Як і для низхідної витрати рідини при менших діаметрах труби висхідна витрата рідини буде меншою при однакових $l-\alpha$, причому незначна зміна діаметра труби призводить до значної зміни висхідної витрати рідини. В свою чергу, незначна зміна і відносного об'ємного вологовмісту призводить до значної зміни висхідної (як і низхідної) витрати рідини. Зменшення внутрішнього діаметра труби потребує меншої витрати повітря для забезпечення висхідної витрати рідини.

Кут нахилу труби також має великий вплив на рух повітряно-рідинної суміші. При нульовому і від'ємних кутах нахилу труби рідина завжди буде рухатись в одному напрямку з повітрям. При цьому рух рідини буде рівномірним. При додатних кутах нахилу труби для забезпечення рівномірного безпульсаційного висхідного руху рідини необхідно зменшувати діаметр труби або збільшувати витрату повітря.

Емпіричний аналіз руху плівки рідини в двофазному середовищі був виконаний Хьюїттом, Джиллом, Мейером, Уоллісом, Хеберстро, Гріффітсом, Бреннером та ін., і його результати описані Уоллісом в [2, стор. 345-395].

У більшості випадків кільцевого висхідного руху вплив гравітаційних сил такий, що дотичне напруження в плівці зменшується від поверхні розділу фаз до стінки. В міру зменшення дотичного напруження на поверхні розділу фаз у результаті зниження швидкості газу відносна зміна напруги по товщині плівки стає більш значною. Зрештою дотичне напруження на стінці падає до нуля, і при подальшому зменшенні напруги на міжфазній поверхні розділу напруга на стінці може прийняти негативне значення. У цьому випадку мається на увазі, що існує спадний рух рідкої фази, що прилягає до стінки [3, стор. 107].

Вираз для градієнта тиску, що відповідає нульовому дотичному напруженню на стінці записується таким чином [3, стор. 108]:

$$\left(-\frac{dP}{dz}\right)_{\tau_0=0} = \rho_g g \frac{r_i^2}{r_0^2} + \rho_f g \left(1 - \frac{r_i^2}{r_0^2}\right), \quad (1)$$

де $(dP/dz)_{\tau_0=0}$ – градієнт тиску, що відповідає нульовому дотичному напруженню на стінці, Па/м;

r_i – радіальне положення (радіальна координата) поверхні розділу фаз, м;
 r_0 – внутрішній радіус труби, м;
 g – прискорення вільного падіння, м/с²;
 ρ_f – густина рідини, кг/м³;
 ρ_g – густина газу, кг/м³.

Якщо частка об'єму, що зайнята в трубі газовою фазою, тобто відносний об'ємний газовміст α виражається відношенням $\alpha = r_i^2 / r_0^2$, то рівняння (1) записується в іншій формі [3, стор. 108]:

$$\left(-\frac{dP}{dz} \right)_{r_0=0} = g [\alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_f]. \quad (2)$$

де α – відносний витратний об'ємний газовміст (середня об'ємна концентрація);

$1 - \alpha$ – відносний витратний об'ємний вологовміст (середня об'ємна концентрація).

Фізичний зміст рівняння (2) полягає в тому, що сила тиску, що діє на елемент каналу, саме достатня для зрівноважування ваги рідини всередині нього. Таким чином, обумовлений тертям градієнт тиску, що визначається з рівняння кількості руху, для цього випадку дорівнює нулю, навіть якщо потенційна енергія рідини розсіюється в результаті в'язкої течії в каналі [3, стор. 108].

Умови, що відповідають мінімальним втратам тиску перед настанням повороту потоку, визначаються із виразу [3, стор. 108]:

$$\left(-\frac{dP}{dz} \right)_{\min} = (2\rho_f - \rho_g)g - 4(\rho_f - \rho_g)g \left(\frac{r_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \right) \ln \left(\frac{r_0}{r_i} \right), \quad (3)$$

де $(dP/dz)_{\min}$ – мінімальна втрата тиску перед настанням повороту потоку, Па/м.

В міру зменшення швидкості газу і проходження градієнта тиску через мінімальне значення відбувається якісна зміна параметрів системи. При високих швидкостях газу дотичні напруження на поверхні розділу фаз і на стінці, а також радіус поверхні розділу зменшуються монотонно із зменшенням витрати газу. В міру наближення до мінімуму значення втрати тиску швидкість зміни різних параметрів збільшується, але при мінімальному значенні градієнта тиску дотичне напруження на стінці залишається ще позитивним. Для досягнення нульової напруги на стінці потрібно подальше невелике зменшення витрати газу. Якщо витрата газу менше значення, при якому спостерігається мінімальний градієнт тиску, дотичне напруження на стінці і на поверхні розділу фаз продовжує знижуватися. Однак тепер товщина плівки рідини збільшується із

зменшенням витрати газу, викликаючи в такий спосіб зменшення вільної для проходження потоку газової фази площі поперечного перерізу. При зазначених умовах течії швидкість зменшення площі поперечного перерізу така, що дійсні втрати тиску зростають зі зменшенням витрати газу. При значеннях витрати газу нижче тих, при яких дотичне напруження на стінці дорівнює нулю, рідина, що безпосередньо прилягає до стінки, стікає вниз. Однак нижче місця введення рідини низхідний рух усіх шарів плівки рідини не встановлюється доти, поки не досягається точка повороту потоку. Семенов і Соловйов, які вивчали область руху в околиці точки переходу від під'ємної до опускної течії, встановили, що при наближенні до точки переходу до опускної течії поверхня плівки може бути покрита (при певних умовах) надзвичайно рівномірними кільцеподібними хвилями [3, стор. 111–112].

Вивчення руху плівки рідини в області між точкою мінімальної втрати тиску і точкою повороту потоку показує, що деяка чи велика частина плівки знаходиться в низхідному русі і поверхня розділу пересічена дуже великими хвилями збурення, які, як виявилось, сприяють чистому переносу рідини нагору. На границі розділу на плівку рідини діють сили тертя з боку газової фази і зрушуюче (дотичне) напруження зменшується у напрямку всередину від поверхні розділу до стінки завдяки впливу протидіючої сили ваги плівки рідини. У тому випадку, якщо дотичне напруження залишається позитивним по всьому перетині плівки, весь потік спрямований нагору; якщо ж дотичне напруження падає нижче нуля (тобто стає негативним), частина потоку рідини буде спрямована вниз [3, стор. 38].

Точне положення точки повороту потоку буде залежати від витрати повітря і рідини, градієнту тиску, діаметра труби, середніх об'ємних концентрацій повітря і рідини, які виражаються через витратні об'ємні газовміст і вологовміст, кута нахилу труби, в'язкості рідини [2, стор. 398] і газу, густини рідини і газу, конструктивного виконання кінців труби [2, стор. 372], геометрії каналу, саме способів підведення і відведення води та повітря [3, стор. 105] а також умов змочуваності труби [1, стор. 38].

Щільність газу лише незначною мірою впливає на значення дотичного напруження (для даної втрати тиску), і для двох заданих тисків газу мінімуми спостерігаються приблизно при одній і тій же втраті тиску. Точне положення точки повороту потоку буде залежати від умов змочуваності стінки труби даною рідиною; у випадку поганої змочуваності (великий крайовий кут) буде створюватись крутий фронт опору, що сприяє утворенню хвиль, що переносить рідину вгору. Навпаки, у системах з гарної змочуваністю рідина може почати рухатися вниз відразу ж після зменшення витрати газу нижче того значення, при якому спостерігається мінімальний градієнт тиску. При такому русі створюються умови, близькі до тих, при яких дотичні напруження на стінці дорівнюють нулю. Точне

положення точки переходу від спіненого руху до кільцевого буде залежати від способу введення рідини: деякі пристрої дозволяють одержати нестійкість плівки рідини, в результаті якої рідина переноситься вгору по трубі [1, стор. 38]. При багатомісному введенні (рис. 1,б) і пристрої для введення з центральним соплом (рис.1,г) складаються умови, при яких винесення рідини вище, ніж при пристрої для введення у вигляді кільцевої щілини (рис. 2.15,а) або у вигляді ділянки трубки з пористою стінкою (рис. 1,в) [3, С. 105-106].

При русі двофазної суміші у вертикальній трубі при $Q_n > Q_{n. \text{кр. пов}}$ рідина являє собою товсту плівку, що рухається вгору по поверхні тонкої стікаючої плівки. Якщо $Q_n < Q_{n. \text{кр. пов}}$, то на поверхні плівки утворюються достатньо високі хвилі, щоб час від часу перекидати переріз труби, утворюючи рідкі перемички [2, стор. 392]. При подальшому зменшенні витрати газу частина рідини, що стікає вниз, збільшується.

Якщо рідина в плівці стікає вниз і не має можливості вилитись із нижньої частини труби, то в цьому випадку в каналі будуть утворюватись рідкі перемички і рух перейде в снарядний [2, стор. 380].

Грехем Уолліс запропонував емпіричне співвідношення для “захлинання” і повороту потоку в вертикальних трубах, яке має такий вигляд [2, стор. 372]:

$$j_g^{*\frac{1}{2}} + x \cdot j_f^{*\frac{1}{2}} = C, \quad (4)$$

де j_f – приведена швидкість рідинної фази, м/с.

j_g – приведена швидкість газової фази, м/с.

x – коефіцієнт, що враховує вплив сил в'язкості;

C – величина, що залежить від конструктивного виконання кінців труб а також від способу подачі і відведення рідини і газу.

Приведені безрозмірні швидкості рідини і газу (котрі представляють модифіковані числа Фруда) визначаються за формулами [2, стор. 370]:

$$j_g^* = \frac{j_g \sqrt{\rho_g}}{\sqrt{gd_0 (\rho_f - \rho_g)}} \quad (5)$$
$$j_f^* = \frac{j_f \sqrt{\rho_f}}{\sqrt{gd_0 (\rho_f - \rho_g)}}.$$

Коефіцієнт x враховує вплив в'язкості. При $Re_f < 1000$, $x = 0,684$; при $1000 < Re_f < 8000$, $x = 0,193 Re_f^{0,183}$; якщо ж $Re_f > 8000$, $x \approx 1$ [2, стор. 398]. Величина C залежить від конструктивного виконання кінців труб, а також способу подачі і відведення рідини і газу і враховує вплив поверхневого

натягу. Для труб з гострими вихідними кромками $C=0,725$; якщо ж кінцевими ефектами можна знехтувати, то $0,88 < C < 1$ [2, стор. 372]. Точні значення C при $n=2,5$ і $n=3,5$ приведені в таблиці 1 [2, стор. 378].

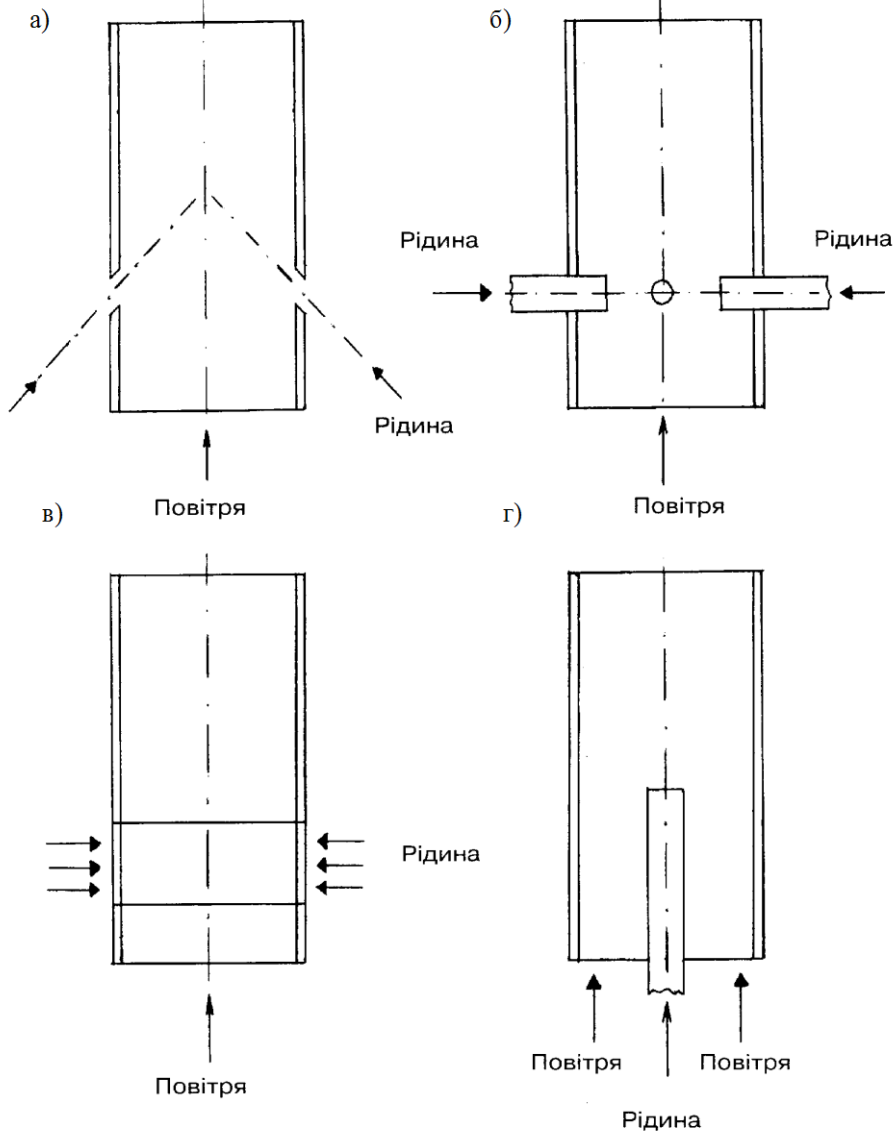


Рис. 1. Способи введення рідини в газовий потік

- а – у вигляді кільцевої щілини;
- б – багатомісний;
- в – у вигляді ділянки трубки з пористою стінкою;
- г – з центральним соплом.

Таблиця 1. Значення C при “захлинанні” (розрахунок з використанням моделі роздільного циліндричного руху, в’язка течія плівки, турбулентна течія газу)

ΔP^*	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
C ($n=2,5$)	1	0,987	0,956	0,929	0,91	0,899	0,893	0,900	0,920	0,951	1
C ($n=3,5$)	1	0,876	0,853	0,826	0,816	0,821	0,837	0,863	0,897	0,941	1

Оскільки табличне представлення даних незручне для автоматизації розрахунків, необхідно представити залежність C від ΔP^* в аналітичному вигляді. Для цього скористаємось формулою [2, стор. 373; 2, стор. 378]:

$$C = \left[\frac{n \cdot \Delta P^{*(1+1/n)}}{2 + (n-2) \cdot \Delta P^*} \right]^n + \frac{2 \cdot (1 - \Delta P^*)^3}{2 + (n-2) \cdot \Delta P^*}, \quad (6)$$

де ΔP^* – безрозмірна приведена втрата тиску.

n – коефіцієнт, що визначає величину параметра Мартінеллі залежно від ступеня збурення двофазного потоку.

Безрозмірна приведена втрата тиску ΔP^* із таблиці 1 і формули (6) визначається за формулами [2, стор. 389; 2, стор. 398]:

$$\Delta P^* = \phi_g^2 \cdot (\Delta P_F)_g^* \quad (7)$$

$$\Delta P^* = \phi_f^2 \cdot (\Delta P_F)_f^* + x \cdot (1 - \alpha)$$

де ϕ_g, ϕ_f – параметри двофазності Мартінеллі.

$(\Delta P_F)_f^*$ – безрозмірна приведена втрата тиску на тертя для випадку, коли весь переріз каналу займає рідина.

$(\Delta P_F)_g^*$ – безрозмірна приведена втрата тиску на тертя для випадку, коли весь переріз каналу займає газ.

Безрозмірні приведені втрати тиску для випадку, коли весь переріз каналу займає газ або рідина, визначаються за формулами [2, стор. 388]:

$$(\Delta P_F)_g^* = \frac{(-\Delta P_F / \Delta z)_g}{g \cdot (\rho_f - \rho_g)} \quad (8)$$

$$(\Delta P_F)_f^* = \frac{(-\Delta P_F / \Delta z)_f}{g \cdot (\rho_f - \rho_g)}$$

де $(\Delta P_F / dz)_f$ – втрата тиску на тертя для рідини, Па/м.

$(\Delta P_F / dz)_g$ – втрата тиску на тертя для газу, Па/м.

Втрату тиску на тертя $-(dP_F/dz)_g$ для випадку, коли весь переріз каналу займає газ, визначають за формулою [3, стор. 148]:

$$-\left(\frac{dP_F}{dz}\right)_g = \lambda \frac{1}{d_0} \frac{\rho_g j_g^2}{2}, \quad (9)$$

а для рідини – за формулою [2, стор. 358; 3, стор. 127]:

$$-\left(\frac{dP_F}{dz}\right)_f = \lambda \frac{1}{d_0} \frac{\rho_f j_f^2}{2}, \quad (10)$$

де λ – коефіцієнт опору тертя (коефіцієнт Дарсі);

d_0 – діаметр труби, м.

Коефіцієнт поверхневого тертя λ для ламінарного руху в круглих трубах визначають за формулою Хагена-Пуазейля [4, стор. 64]:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}, \quad (11)$$

де Re – критерій Рейнольдса.

Для турбулентного руху коефіцієнт поверхневого тертя λ в першому приближенні приймають рівним 0,005 [2, С.45; С.73]. Для точних розрахунків найчастіше використовують формулу Блазіуса [2, стор. 359; 3, стор. 46–48; 4, стор. 65]:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}}. \quad (12)$$

Критерій Рейнольдса визначають з формули [5, стор. 138–140, 581–588; 6, стор. 338–342]:

$$\text{Re} = \frac{v d_0}{\nu} = \frac{\rho \square d_0 v}{\mu}, \quad (13)$$

де v – швидкість руху фази, м/с.

ν – кінематична в'язкість, м²/с.

μ – динамічна в'язкість, Па·с.

який для круглих труб набуває вигляду:

$$\text{Re} = \frac{4Q\rho}{\pi d_0 \mu}, \quad (14)$$

де Q_g – витрата води, м³/с.

Підставивши в вираз 4 формули 5, отримаємо:

$$\sqrt{\frac{j_g \cdot \sqrt{\rho_g}}{\sqrt{g \cdot d_0 (\rho_f - \rho_g)}}} + x \cdot \sqrt{\frac{j_f \cdot \sqrt{\rho_f}}{\sqrt{g \cdot d_0 (\rho_f - \rho_g)}}} = C. \quad (15)$$

Для суміші повітря і робочої рідини пестицидів рівняння (15) набуде вигляду:

$$\sqrt{0,011 \cdot \frac{j_n}{\sqrt{d_0}} + x} \cdot \sqrt{0,32 \cdot \frac{j_p}{\sqrt{d_0}}} = C. \quad (16)$$

З формули (16) виразимо приведену швидкість повітря і позначимо її як приведена гранична швидкість повітря $j_{n. \text{ зр. нов.}}$, при якій відбувається поворот потоку:

$$j_{n. \text{ зр. нов.}} = \frac{\sqrt{d_0}}{0,011} \cdot \left(C^2 - 0,32 \cdot x^2 \cdot \frac{j_p}{\sqrt{d_0}} \right). \quad (17)$$

Виразивши приведену граничну швидкість $j_{n. \text{ зр. нов.}}$ через витрату, отримаємо вираз для визначення граничної витрати повітря $Q_{n. \text{ зр. нов.}}$, при якій відбувається поворот потоку для суміші повітря з робочою рідиною пестицидів:

$$Q_{n. \text{ зр. нов.}} = 71,4 \cdot d_0^{2,5} \cdot \left(C^2 - 4 \cdot x^2 \cdot \frac{Q_p}{d_0^{2,5}} \right). \quad (18)$$

Для випадку, коли $Re_f < 1000$, вираз (18) набуде вигляду:

$$Q_{n. \text{ зр. нов.}} = 71,4 \cdot d_0^{2,5} \cdot \left(C^2 - 1,87 \cdot x^2 \cdot \frac{Q_p}{d_0^{2,5}} \right); \quad (19)$$

при $1000 < Re_f < 8000$:

$$Q_{n. \text{ зр. нов.}} = 71,4 \cdot d_0^{2,5} \cdot \left(C^2 - 1,87 \cdot x^2 \cdot \frac{Q_p^{1,183}}{d_0^{3,687}} \right); \quad (20)$$

для $Re_f > 8000$

$$Q_{n. \text{ зр. нов.}} = 71,4 \cdot d_0^{2,5} \cdot \left(C^2 - \frac{Q_p}{d_0^{2,5}} \right). \quad (21)$$

Визначення граничної витрати повітря за виразами (19–21) досить трудомістке. Тому Уоллісом та ін. були визначені спрощені емпіричні формули для визначення безрозмірних приведених граничних швидкостей повітря $j_{n. \text{ зр. нов.}}$, при яких відбувається поворот потоку [2, стор. 380]:

– для турбулентного руху рідини:

$$j_g^* \approx 0,9; \quad (22)$$

– для ламінарного руху рідини:

$$j_g^* \approx 0,8. \quad (23)$$

де j_f^* – приведена безрозмірна швидкість рідинної фази, м/с.

j_g^* – приведена безрозмірна швидкість газової фази, м/с.

Підставивши в формули (22) і (23) вираз (4) і виразивши приведену швидкість повітря через витрату, матимемо спрощені вирази для

визначення граничних витрат повітря $Q_{n. гр. пов.}$, при яких відбувається поворот потоку для суміші повітря з робочою рідиною пестицидів:

– для турбулентного руху рідини:

$$Q_{n. гр. пов.} \approx 64 \cdot d_0^{2.5}; \quad (24)$$

– для ламінарного руху рідини:

$$Q_{n. гр. пов.} \approx 57 \cdot d_0^{2.5}. \quad (25)$$

Залежність мінімальної втрати тиску від відносного об'ємного вологовмісту наведена на рис. 1.а. Розрахунки велись на персональному комп'ютері в програмі MATHCAD. Із наведених результатів розрахунків видно, що при зростанні відносного об'ємного вологовмісту зростають і втрата тиску при нульовому дотичному напруженні і мінімальна втрата тиску. Зміна діаметра труби суттєвого впливу них не має. Значення втрати тиску при нульовому дотичному напруженні і мінімальної втрати тиску досить близькі, але втрата тиску при нульовому дотичному напруженні трохи перевищує значення і мінімальної втрати тиску. Отже, якщо в каналі з висхідним рухом рідинно-газової суміші при зростанні втрати тиску вона досягає значення мінімальної втрати тиску, сила повітряного напору ще перевищує гравітаційні сили і рух плівки рідини ще залишається висхідним. При подальшому підвищенні втрати тиску і досягненні значення втрати тиску при нульовому дотичному напруженні шари плівки рідини, які розташовані ближче до стінки труби, починають рухатись вниз, спостерігається процес "захливання". При подальшому збільшенні втрати тиску все більше шарів плівки рідини рухаються вниз, аж поки весь потік не матиме низхідний рух. Відбувається поворот потоку, рух переходить в снарядно-кільцевий і кільцевий режими, при яких площа перетину, вільна для проходження повітря, поступово зменшується аж до утворення рідинних перемичок, при цьому втрата тиску різко зростає.

Залежність граничної витрати повітря $Q_{n. гр. пов.}$, при якій відбувається поворот потоку для суміші повітря з робочою рідиною пестицидів (при ламінарному її русі) від діаметра труби, що отримана за спрощеною емпіричною формулою Уолліса (25), залежність $Q_{n. гр. пов.}$ від діаметра труби при $(1-\alpha)=0,02$, що отримана за повною емпіричною формулою Уолліса (19) (ламінарний рух рідини, $n=2$) представлені на рис. 2.16 (б, в).

Висновки

Існують певні значення градієнтів тиску, які називаються *втратою тиску при нульовому дотичному напруженні і мінімальною втратою тиску*, а також *граничною витратою повітря $Q_{n. гр. пов.}$* , які характеризують процеси "захливання" і повороту потоку, тобто перехід від низхідного до висхідного руху рідини, і навпаки. Якщо в каналі з висхідним рухом рідинно-газової суміші при зменшенні витрати повітря і зростанні втрати тиску остання досягає значення мінімальної втрати тиску, сила повітряного напору ще перевищує гравітаційні сили і рух плівки рідини ще залишається висхідним.

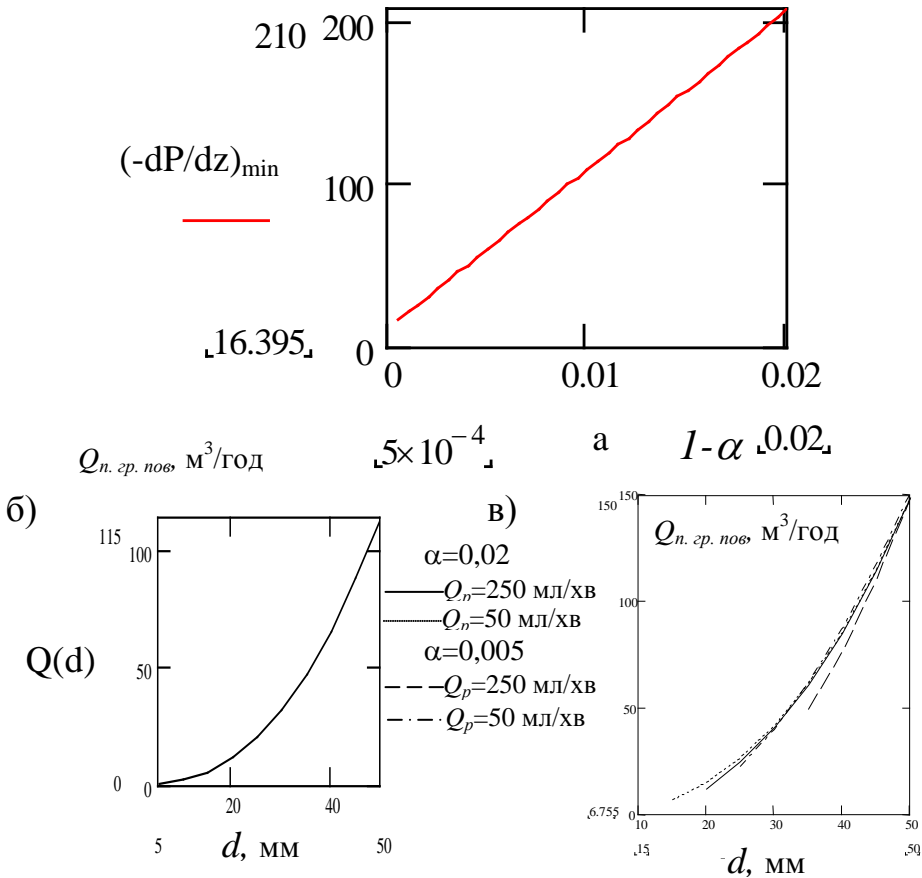


Рис. 2. Залежності мінімальної втрати тиску і граничної витрати повітря $Q_{n.гр.пов}$, при якій відбувається поворот потоку відносного об'ємного вологовмісту $(1-\alpha)$

а – $(-dP/dz)_{\min} = f(d, (1-\alpha))$;

б – $Q_{n.гр.пов} = f(d, (1-\alpha))$, визначена за формулою 25;

в – $Q_{n.гр.пов} = f(d, (1-\alpha))$, визначена за формулою 19.

Це значення витрати називається також **гранична витрата повітря** $Q_{n.гр.пов}$. При подальшому зменшенні витрати повітря і досягненні градієнта тиску шари плівки рідини, які розташовані ближче до стінки труби, починають рухатись вниз, спостерігається процес “захлинання”. При подальшому збільшенні втрати тиску все більше шарів плівки рідини рухаються вниз, аж поки весь потік не матиме низхідний рух. Відбувається поворот потоку, рух переходить в снарядно-кільцевий і кільцевий режими, при яких площа перетину, вільна для проходження повітря, поступово зменшується аж до утворення рідинних перемичок,

при цьому втрата тиску різко зростає і рідинні перемички виплескуються через край труби. Спостерігаються великі пульсації тиску повітря і витрати рідини.

Точне положення точки повороту потоку буде залежати від витрати повітря і рідини, градієнту тиску, діаметра труби, середніх об'ємних концентрацій повітря і рідини, які виражаються через витратні об'ємні газовміст і вологовміст, кута нахилу труби, в'язкості рідини [2, стор. 398] і газу, густини рідини і газу, конструктивного виконання кінців труби [2, стор. 372], геометрії каналу, а саме способів підведення і відведення води та повітря [1, стор. 105], а також умов змочуваності труби [1, стор. 38].

При зменшенні діаметра і відносного об'ємного вологовмісту величина граничної витрати повітря $Q_{n. \text{ гр. пов}}$ зменшується. При додатному куті нахилу труби із збільшенням кута нахилу $Q_{n. \text{ гр. пов}}$ збільшується.

Література

1. *Поліщук В.М.* Система дозування робочої рідини пневмомеханічного обприскувача // Вісник Інженерної Академії України. Київ, 2001, №2. Ювілейний випуск. С. 87-91.
2. *Уоллис Грэхэм Б.* Одномерные двухфазные течения. Перевод с англ. к.т.н. *В.С. Данилишина* и *Ю.А. Зейгарника*. Под ред. проф. *И.Т. Аладьева*. – М: Мир,
3. *Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н.* Кольцевые двухфазные течения. Перевод с англ. *В.Я. Сидорова*. – М: Энергия, 1974. – 405 с. с ил.
4. *Иванов О.П., Мамченко В.О.* Аэродинамика и вентиляторы – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 280 с.
5. *Штеренлихт Д.В.* Гидравлика: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
6. *Киселев П.Г.* Гидравлика: Основы механики жидкости. Учеб. Пособие для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с.