

Код МРНТИ 86.40.00

М.К. Есенов¹, *Л.И. Раматуллаева¹, А.А. Волненко¹, Г.К. Ивахнюк²¹AUEZOV UNIVERSITY (Шымкент қ., Қазақстан),²САНКТ-ПЕТЕРБУРГ МЕМЛЕКЕТТІК ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ИНСТИТУТЫ
(Санкт-Петербург қ., Ресей)

ҚОРШАҒАН ОРТАНЫ ҚОРҒАУ ҮШІН АЭРОЗОЛЬ БӨЛШЕКТЕРІН ҰСТАУДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

Аннотация. Бұл мақалада газ-дисперсті қатты материалдар жүйесінде процестерді жүргізу үшін агрегаттарды экологиялық жаңғырту мәселелері ашылады және барабанды кептіру агрегатындағы аэрозоль ағынын бөлудің ғылыми негіздері қарастырылады. Тегіс және цилиндр тәрізді арналарда аэрозоль ағыны бөлшектерінің турбулентті-инерциялық тұндыруын бағалау көрсетілген. Тегіс және цилиндрлік беттерде аэрозоль ағынының динамикалық жылдамдығы анықталды. Аэрозоль ағынын бөлу тиімділігін бағалаудың энергетикалық тәсілі қарастырылды. Барабанды кептіргіште аэрозоль ағынының бөлшектерін бөлу тиімділігін бағалау ұсынылған. Келтірілген зерттеулер кептіру агрегаттарының жұмысын оңтайландыруға және олардың өнімділігін арттыруға арналған жаңа тәсілдер мен әдістерді ұсынады. Олар газдисперсиялы қатты материалдарды өңдеу технологияларын әрі қарай дамытуға қажетті маңызды деректерді ұсынады, бұл қоршаған ортаға теріс әсерді азайтуға ықпал етеді.

Түйінді сөздер: турбуленттілік, инерция, тұндыру, бөлшектер, аэрозоль ағыны, тегіс және цилиндрлік бет.

Optimizing the capture of aerosol particles to protect the environment

Abstract. This article reveals the problems of environmental modernization of aggregates for conducting processes in a system of gas – dispersed solid materials and considers the scientific basis for the separation of aerosol flow in a drum drying aggregate. Evaluation of turbulent-inertial deposition of aerosol flow particles in smooth and cylindrical channels is shown. On smooth and cylindrical surfaces, the dynamic speed of the aerosol flow is determined. An energy approach to assessing the efficiency of aerosol flow distribution was considered. It is proposed to evaluate the efficiency of separation of Aerosol Jet particles in a drum dryer. The cited studies suggest new approaches and methods for optimizing the operation of drying aggregates and increasing their productivity. They provide important data necessary for the further development of technologies for processing gasdispersed solid materials, which will contribute to reducing the negative impact on the environment.

Key words: turbulence, inertia, deposition, particles, aerosol flow, smooth and cylindrical surface.

Оптимизация улавливания аэрозольных частиц для защиты окружающей среды

Аннотация. В данной статье раскрываются вопросы экологической модернизации агрегатов для проведения процессов в системе газодисперсных твердых материалов и рассматриваются научные основы распределения аэрозольного потока в барабанном сушильном агрегате. Показана оценка турбулентно-инерционного осаждения частиц аэрозольного потока в гладких и цилиндрических каналах. Определена динамическая скорость потока аэрозоля на гладких и цилиндрических поверхностях. Рассмотрен энергетический подход к оценке эффективности распределения аэрозольного потока. Предложена оценка эффективности разделения частиц аэрозольного потока в барабанной сушилке. Приведенные исследования предлагают новые подходы и методы оптимизации работы сушильных агрегатов и повышения их производительности. Они предоставляют важные данные, необходимые для дальнейшего развития технологий переработки твердых газодисперсных материалов, что способствует снижению негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: турбулентность, инерция, осаждение, частицы, аэрозольный поток, гладкая и цилиндрическая поверхность.

Кіріспе

Өздеріңіз білетіндей, химиялық және мұнай-химия өнімдерінің өзіндік құнының құрылымында шикізат пен материалдардың үлес салмағы шамамен 40% құрайды, ал энергия ресурстарының үлесі шамамен 20% құрайды және жыл сайын артып келеді. Айта кету керек, Қазақстанда осындай өндірістерге энергия тұтыну шетелдік тұтынудан 30-70%-ға асады, сондықтан қондырғыларды энергия үнемдейтін жаңғырту міндеттері ерекше өзекті болып табылады және олар көбінесе экологиялық міндеттерді шешумен ұштасады [1].

Алайда, технологиялық аппараттарды немесе агрегаттарды жобалау кезінде мыналар ескерілмейді:

- 1) ең аз шаңсорғыштың талаптарын ескере отырып, аппараттарды құрастыру мүмкіндігі;
- 2) өзара әрекеттесетін ағындардың экологиялық ұтымды жылдамдықтарын таңдау;
- 3) осы қажетсіз процестің басында шаңды басу немесе шаңның азаюы.

Қазір Қазақстанның химия, мұнай-газ өңдеу, мұнай-химия, тау-кен, агроөнеркәсіп және тамақ салаларының қолданыстағы аппараттары мен агрегаттарын қайта құру мүмкін емес:

- салалық машина жасаудың өнеркәсіптік базасы жоқ;
- Қазақстан экономикасының түрлі салаларында технологиялық және экологиялық техниканы қайта құру үлкен күрделі шығындармен ұштасады.

Сондықтан аталған проблемаларды шешудегі ең үнемді және экологиялық негізделген тәсіл кез келген өндірістің

агрегаттарын (аппараттарын) экологиялық жаңғырту болып табылады. Жоғарыда айтылғандар кез келген бетке аэрозоль бөлшектерінің тұндыру процестерін түбегейлі зерттеуді қажет етеді.

Материалдар мен әдістер

Технологиялық құрылғыдан шаңды кетірудің жарқын мысалы-кептіргіш-барабан аппараты, онда материал бөлшектерінің дисперсиясы мен тығыздығына сүйене отырып, барабанның қимасы бойынша газдардың жылдамдығы таңдалады. Есептеу үшін барабандағы газдың орташа жылдамдығының келесі мәндерін қабылдауға болады (м/с) (1-кесте).

1-кестеден көріп отырғанымыздай, барабандағы газдың жылдамдығын таңдау кезінде аппараттың өзінде шаң бөлшектерінің тұндырылуын және оларды қосалқы құрылғыларда (түсіру камерасында, шаң түсіретін камераларда немесе шаң ұстайтын аппараттарда) ұстау тиімділігін ескеретін факторлар келтірілмеген.

Технологиялық қондырғыларда аэрозольдер газ ағынының айқын турбулентті режимі орын алатын айтарлықтай жылдамдықпен аппараттар арқылы қозғалады. Бұл режим ламинарлық ағымнан бойлық және басқа бағыттардағы жылдамдықтың кездейсоқ хаотикалық пульсацияларының болуымен, газдың қарапайым көлемдерінің бір-бірімен араласуымен және нәтижесінде газдың неғұрлым қарқынды диффузиясымен және оның жылдамдығының қабырғаларда күрт төмендеуімен ерекшеленеді.

Кесте 1

Барабандағы газ жылдамдығының бөлшектердің тығыздығы мен мөлшеріне тәуелділігі

Table 1

Dependence of gas velocity in the drum on density and particle size

Таблица 1

Зависимость скорости газа в барабане от плотности и размера частиц

Бөлшектердің мөлшері, мм	Материалдың тығыздығы, кг/м ³				
	350	1000	1400	1800	2200
Газ жылдамдығы, м/с					
0,3-2,0	0,5-1,0	2,0-5,0	3,0-7,5	4,0-8,0	5,0-10,0
2,0-ден жоғары	1,0-3,0	3,0-5,0	4,0-8,0	6,0-10,0	7,0-12,0

Аппарат арналарындағы газ ағынының жоғары қозғалыс жылдамдығында бөлшектердің турбулентті диффузия коэффициенті броундық диффузия коэффициентінен едәуір асып түседі, сондықтан турбулентті тұндыру негізгі механизм болып табылады. Құбырлардың қабырғасына (немесе сұйықтық пленкасына) бөлшектердің турбулентті тұндыруының әртүрлі теориялық модельдері белгілі:

1) инерциялық. Бұл модельге сәйкес, тұндыру бетімен шекарада құйынды ағындардан бөлшектердің еркін инерциялық шығарылуы орын алады деп саналады;

2) тұндыру процесін шекаралық қабатқа ірі масштабты құйындар енген кездегі инерциялық әсерлермен байланыстыратын конвективті-инерциялық;

3) қабырға аймағында бөлшектердің турбулентті диффузия коэффициенті басқаларға қарағанда жоғары деген болжамнан туындайтын диффузиялық;

4) газ жылдамдығының пульсациялық көлденең құрамдас бөлігінің амплитудасы градиентінің салдары ретінде бөлшектердің канал қабырғасына турбулентті миграциясы ескерілетін турбулентті-диффузиялық.

Аэрозольді (тұманды) тұндырудың барлық дерлік механизмдері таза түрде жүзеге асырылмайды және негізінен ДН бөлшектерінің мөлшеріне байланысты. Мысалы, таза инерциялық тасымалдау ДН>5-10 мкм, ал диффузиялық ДН<1-2 мкм кезінде орын алады.

Өндіріс шаңы субмикроннан (0,1 мкм-ден аз) үлкенге (>100 мкм) дейін полидисперсті екенін ескере отырып, шаңды ұстаудың тиімділігін есептеу кезінде барлық төрт тұндыру моделін ескеру қажет.

Нәтижелер

Газдарды ұсақ дисперсті фазадан тазарту кезінде турбулентті-инерциялық механизм өте маңызды. Бұл жағдайда барлық бөлшектер қабырғаға инерциялық жүгіріс ұзындығында тұндырылады деп болжанады [2]:

$$l_{\text{ч}} = \frac{u_{\text{ч}} d_{\text{ч}}^2 \rho_{\text{ч}}}{18\mu_{\text{г}}}, \quad (1)$$

$u_{\text{ч}}$ – тасымалдаушы (газ) ағынының жылдамдығына тең инженерлік есептеулерде қабылданатын бөлшектердің көші-қон жылдамдығы, м/с $W_{\text{з}}$;

$d_{\text{ч}}$ – аэрозоль бөлшектерінің диаметрі (тұман), мм;

$\rho_{\text{ч}}$ – материалдың тығыздығы бөлшектер, кг/м³;

$\mu_{\text{г}}$ – тасымалдаушы ағынның динамикалық тұтқырлық коэффициенті, Па·с.

Айта кету керек, ағынның ядросында бөлшектердің көлденең бағытта қозғалуы турбулентті пульсацияларға байланысты, ал қабырғаға жақын жерде – шекаралық қабаттағы әлсіреген турбулентті пульсациялардың әсерінен инерциялық механизммен жүреді.

Қысқа құбырлардағы ағынның турбулентті қозғалысы кезінде жауын-шашынның орташа жылдамдығы ұзын құбырларға қарағанда айтарлықтай төмен, бұл кіріс тұрақсыз аймақтың әсеріне байланысты. Бөлшектердің турбулентті тұндыру тиімділігі тұндыру бетінің күйіне (кедір-бұдырлық, сұйықтық пленкасының болуы және т.б.) байланысты. Құрғақ бетінде бөлшектер 5 мкм-ден аспайды, ал 20-50 мкм-ге дейін жақсы суланған.

Бөлшектердің арна қабырғасына (пленкасына) бөліну қарқындылығын шамамен бағалау үшін турбулентті араластыру нәтижесінде дисперсті фазаның қабырғалардан алыс (шекаралық қабаттан тыс) концентрациясы тек турбулентті миграция мен диффузиямен анықталатыны қабылданады:

$$u_{\text{т}}^+ = \frac{u_{\text{т}}}{u_*}, \quad (2)$$

u_* – турбулентті пульсациялардың орташа квадраттық жылдамдығы. Инженерлік есептеулерде $u_* \approx 0,9u_{\text{т}}$.

Аэрозоль ағыны әртүрлі арналар арқылы қозғалған кезде олардың бетінде әртүрлі механизмдердің арқасында дисперсті фаза бөлінеді.

Турбулентті ағындағы инерциясыз дисперсті бөлшектерге турбулентті-диффузиялық көші-қон әсері әсер етеді. Инерциялық дисперсті бөлшектерге сұйықтық ток желілері әсер етпейді, олар қоршаған ортаның турбулентті пульсацияларына тәуелді емес, сондықтан олардың қозғалысын түзу деп санауға болады. Арналардың бетіндегі инерциялық дисперсті бөлшектің тұндыру тиімділігі негізінен олардың геометриялық өлшемдерімен анықталады. Әлсіз инерциялық дисперсті бөлшектерді екі бөлікке бөлуге болады. Біріншісі-релаксация кезінде саптаманың бетіне жетіп, оған қонуға үлгеретін бөлшектер. Екіншісі-газ ағынының әсеріне ұшыраған бөлшектер, олар тұндыру бетіне жақындаған кезде оған қонуға үлгермейді.

Газ ағынындағы бөлшектердің қозғалыс траекториясын жалпы кездейсоқ жол ретінде қарастыруға болатыны белгілі, өйткені қозғалыс процесінде оған бірнеше факторлар әсер етеді, олардың кейбіреулері кездейсоқ.

Кезінде саптаманың бетіне түскен бөлшектердің саны ДТ дисперсті бөлшектері бар газ ағыны $dz = u_{\text{ср}} dt$ жолынан өтеді және осылайша бөлшектердің концентрациясы шамаға өзгереді dn .

$$dN = -V_{\text{г}} dn dt = -u_{\text{ср}} S dn dt, \quad (3)$$

$V_{\text{г}}$ – газдың көлемдік шығыны, м³/с;

$u_{\text{ср}}$ – көлденең қимасы бар арнадағы газдың орташа жылдамдығы (м/с) S , м².

Дт кезінде тұндыру беттеріне одан $dz = utdt$ аспайтын қашықтықта орналасқан бөлшектер ғана қол жеткізе алады, яғни dz учаскесінде конустың dV көлеміндегі барлық бөлшектер қабырғаға биіктігі бойынша түседі $2dz$:

$$dN = ndV = n2\pi Rdrdz u_t dt^2 \quad (4)$$

Содан кейін мынаны ескере отырып $V_r = u_{cp} \pi R^2$, алуға болады:

$$\frac{dn}{n} = -\frac{2u_t}{R} dt = -\frac{4u_t}{d} dt. \quad (5)$$

$d = 2R$ – арна диаметрі, м.

$T = 0$ -ден $t = L/ISR$ аралығындағы $t = 0$ -де $n = N0$ бастапқы шартымен (5) теңдеулерді біріктіре отырып, біз l қашықтықтағы газ ағынындағы бөлшектердің сандық концентрациясын анықтау үшін өрнек аламыз:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{4}{du_{cp}} \int_0^l u_t dz\right), \quad (6)$$

немесе $u_t = const$

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{4lu_t}{du_{cp}}\right) \approx n_0 \exp\left(-\frac{4u_t}{d} t_{cp}\right), \quad (7)$$

$t_{cp} \approx l/u_{cp}$ – орташа болу уақыты.

Тұндырылған бөлшектердің үлесін немесе әлсіз инерциялық бөлшектерді бөлу тиімділігін турбулентті тұндыру тиімділігінің шамасымен көрсетуге болады

$$n_t = \frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - \exp\left(-\frac{4lu_t}{du_{cp}}\right), \quad (8)$$

n_0 – бөлшектердің бастапқы концентрациясы, $1/m^3$;

d – арнаның диаметрі немесе оның эквивалентті диаметрі d_e , м;

l – арнаның ұзындығы, м.

Бөлу тиімділігінің арна ұзындығына тәуелділігі пластиналық шаң жинағыштардың, электрофилтрлердің, инерциялық және центрифугалық сепараторлардың, Вентури скрубберлерінің және басқа құрылғылардың тиімділігін есептеу үшін пайдаланылуы мүмкін. Алынған өрнектер дымқыл шаң жинаудың энергетикалық теориясына және эксперименттік зерттеулердің нәтижелеріне жақсы сәйкес келеді.

Талқылау

Кез-келген қондырғыда немесе аппаратта болатын жылу және масса алмасу процестерін математикалық модельдеу кезінде өзара әрекеттесетін ағындардың динамикалық жылдамдығына байланысты шекаралық (турбулентті немесе диффузиялық) қабаттың қалыңдығынан бастау керек.

Диффузиялық массаны тасымалдау және аэрозольдің (тұманның) ұсақ бөлшектерінің диффузиялық тұндыру ұқсастығынан бұл мәселе шаң жинаудың тиімділігін бағалау кезінде де маңызды екендігі шығады.

Өкінішке орай, аэрозоль ағынын бөлу проблемасына тиісті көңіл бөлінбеді. Сондықтан аэрозоль ағынының қозғалысы мен бөлінуінің көптеген мәселелері тиісті іргелі шешімсіз қалды.

Әдетте тегіс немесе құбырлы элементтерден тұратын әртүрлі конструкциялардың жанасу аймағындағы шекаралық қабаттың сипаттамаларын бағалау кезінде динамикалық жылдамдық есептелетін жерлердің тангенс кернеуінің орташа мәнін анықтау қажет $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$:

$$u_* = W_0 \sqrt{C_m/2}, u_* = W_0 \sqrt{\xi/8}, \quad (9)$$

W_0 – арналардағы ағынның немесе ағынның жылдамдығы, м/с;

C_m – тегіс бет бойымен ағынның қозғалысы кезіндегі үйкеліс коэффициенті;

ξ – кедергіні айналып өту кезіндегі кедергі коэффициенті.

Егер St немесе st белгісіз болса, динамикалық жылдамдық көлем бірлігінде орташа диссипацияланатын энергияны пайдалану арқылы анықталады:

$$\varepsilon = \mu \left\{ 2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_{yz}}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 \right\}. \quad (10)$$

Алайда, (10) теңдеу айтарлықтай қиындықтарға байланысты қолданбалы есептеулер үшін жарамсыз. Неғұрлым жеңілдетілген, тұтқырлыққа байланысты ортада және du/du жылдамдық градиентінде энергияның диссипация жылдамдығын келесідей көрсетуге болады:

$$\varepsilon = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)^2. \quad (11)$$

Жазу негізінде:

$$u_* = K \left(\frac{\varepsilon \nu}{\rho} \right)^{1/4}, \quad (12)$$

пропорционалдылық коэффициенті k құрылғының әр түрі үшін эксперименталды болып табылады және $K = 1,6-2,9$ аралығында орнатылады. Көптеген құрылғылар үшін қабылдау ұсынылады $K \approx 2,2$.

Осы тәсілге сүйене отырып, әртүрлі формадағы арналарда газдың қозғалысы кезінде дисперсті фазаның болуын ескере отырып, динамикалық жылдамдықтың мәнін анықтауға болады.

Белгілі [3, 4, 5] турбулентті шекара қабаты, кез-келген тұрақты статистикалық жүйе сияқты, кейбір консервативті қасиеттерге ие. Жұқа қабырға аймағының турбулентті ағындарында жылдамдық профилі логарифмдік заңмен сипатталады және қысым градиентіне әлсіз тәуелді. Турбулентті шекаралық қабаттың сыртқы аймағында жылдамдықтың таралуына ($\approx 0,668$) қысым градиенті айтарлықтай әсер етеді.

Қысым градиенттері бар турбулентті шекара қабатын есептеу әдіснамасының жалпы ерекшеліктері шекара қабатының тән қалыңдығы ретінде импульсті жоғалту қалыңдығын пайдалану болып табылады. Қысым градиентіне қатты тәуелді жылдамдық профилін сипаттау үшін әртүрлі параметрлер енгізіледі. Импульстің жоғалу қалыңдығы импульстік теореманың көмегімен есептеледі, мұнда қабырғадағы тангенс кернеуі бойлық жеңілдетілген пластина үшін қарсылық Заңын қолдана отырып анық-

талады. Өртүрлі пішіндегі денелердің үйкеліс кедергісін есептеу кезінде қолданылатын мұндай әдістер қанағаттанарлық нәтиже береді [3].

Газ динамикасында үйкеліс кедергісін және өртүрлі беткей қисықтығы бар денелердің жылу алмасуын есептеу үшін тиімді ұзындық әдісі қолданылды [6, 7]. Бұл жағдайда жеңілдетілген беттің қисаюынан туындаған қысым градиентінің әсері градиентті және градиентсіз шекаралық қабаттардың энергия шығыны қалыңдығының теңдігі орындалған жағдайда тиімді ұзындықты таңдау арқылы ескеріледі. Қысым градиенті бар шекаралық қабаттың белгілі тиімді ұзындығымен олар тегіс пластинаның тиісті формулаларын қолдана отырып есептеледі. Динамикалық жылдамдықтың орташа мәнін анықтаудың теориялық негізі ретінде тегіс шекаралық қабаттың математикалық модельдерін бұзылуларсыз қолдануға болады (мысалы, Прандтль, қалта, Ландау-Левич модельдері) және әр түрлі бұзылулардың әсерін (қысым градиенті, беттің кедір-бұдырлығы, дисперсті фазаның болуы) фазааралық бетке жазылған импульс тепе-теңдігінің интегралды қатынасын қолдана отырып қарастыруға болады. процесті физикалық модельдеу нәтижелерін қолдануға негізделген [12].

Динамикалық жылдамдықты есептеу үшін теңдеуді алу үшін газ ағынында аэрозольдердің болуын ескере отырып, әр түрлі формадағы арналарда біз шекаралық қабаттың консервативті қасиеттерін қолданамыз, ал аэрозольдер мен басқа да бұзылулардың әсерін импульс балансын қанағаттандыру арқылы параметрлік түрде ескереміз.

Турбулентті шекара қабатындағы импульс ағыны белгілі формада жазылады:

$$\tau = \rho(v + v_m) \frac{du}{dy} \quad (13)$$

тұтқыр ішкі қабаттағы турбулентті алмасу коэффициенті үшін өртүрлі қуат функциялары қолданылады, ал одан тыс сызықтық функциялар қолданылады. Мысалы, prandtle моделіне сәйкес түр функциясы:

$$v_m = \chi u_* y - v, \quad (14)$$

$\chi = 0,4$ – Прандтль тұрақтысы.

Содан кейін, алуға болады:

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_*}{\chi y} \quad (15)$$

Бұл өрнектің интеграциясы шекаралық қабаттың турбулентті аймағында жылдамдық профилінің логарифмдік таралуын береді.

Турбулентті шекара қабатындағы тангенс кернеуін пульсациялық жылдамдықтардың құрамдас бөліктерінің орташа мәндері арқылы көрсетуге болады v' и u' :

$$\tau = \rho u' v'. \quad (16)$$

Содан кейін энергия ағынының орташа тығыздығы келесідей болады:

$$\varepsilon = \rho u u' v' = u \tau. \quad (17)$$

Энергияның диссипациясына байланысты бұл ағын жер бетіне жақындаған сайын азаяды. Туынды орта көлемінің бірлігінде энергияның диссипациясын береді:

$$\varepsilon = \frac{de}{dy} = \tau. \quad (18)$$

Егер туынды мән болса $\frac{du}{dy}$ (15) түрінде жазылған (18)

өрнекте мынаны аламыз:

$$\varepsilon = \frac{\rho_r}{\chi y} \left(\frac{\tau}{\rho_r} \right)^{2/3} = \frac{\rho_r u_*^3}{\chi y}. \quad (19)$$

Әлбетте, белгілі бір мәнмен $y = \delta$, энергияның жергілікті диссипациясы орташа көлемдік диссипациямен сәйкес келеді, яғни $\varepsilon = \bar{\varepsilon}$ кезінде и $y = \delta$.

Тұтқыр ішкі қабаттағы сызықтық жылдамдық профилін және негізгі ағындағы логарифмдік үлестіруді ескере отырып, импульс ағынының тұрақтылығын және оның қабырғадағы импульс ағынының теңдігін болжайтын екі қабатты прандтль қабырғалық турбуленттілік моделін қабылдайық. Содан кейін динамикалық жылдамдық $y = \delta$, пайда болады:

$$u_* = \left(\frac{\varepsilon x \delta_0}{\rho_r} \right)^{1/3}, \quad (20)$$

(20) өрнегінде негізгі параметрлер энергияның диссипациясы және қабаттың тиімді қалыңдығы болып табылады. э. энергияның орташа диссипациясын дисперсті фазаның болуын ескере отырып эксперименталды түрде алынған арналардағы қысым айырмашылығын қолдана отырып табымыз. Тиімді шекаралық қабаттың орташа қалыңдығын импульс балансының теңдеуі негізінде аламыз.

(20) өрнектегі энергияның орташа диссипациясын қысымның жоғалуы арқылы жазамыз:

$$\varepsilon = \frac{\Delta P S W_{cp}}{V_0}, \quad (21)$$

ΔP – қысымның жоғалуы, Па;

S – байланыс аймағы арнасының ауданы, м²;

V_0 – қозғалмалы ағын алатын байланыс аймағының көлемі, м³.

Осылайша, ұсақ бөлшектердің диффузиялық тұндыру механизмін қанағаттанарлық сипаттайтын тегіс немесе цилиндрлік беттегі аэрозоль ағындарының динамикалық жылдамдығын бағалауға қарапайым аналитикалық тәсіл ұсынылады.

Газ-ауа ағынында бөлу процестері мен аппараттарын есептеу әдістерін әзірлеу жылу және масса алмасу процестерін жүргізу үшін технологиялық маңызы бар агрегаттардың да, шанды ұстауға арналған экологиялық техниканың да тиімділігін есептеу кезінде айтарлықтай маңызға ие. Бұл мәселенің іргелі негіздері елді мекендердің, кәсіпорындардың және автокөлік құралдарының ауа бассейнін ластаудың стационарлық және жылжымалы көздерінен бөлінетін шаң бөлшектерінің тұнбасын бағалау кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Шаң жинау процесінің тиімділігі көбінесе энергия шығындарымен анықталатыны анықталды. Өткен ғасырдың екінші жартысында шаң жинағыштың тиімділігі қысымның жоғалуына айтарлықтай тәуелді екендігі анықталды. Газдарды тазарту дәрежесі мен энергия шығындары арасындағы байланысты келесідей көрсетуге болады [9, 10, 11]:

$$n = 1 - \exp(-A\varepsilon^k), \quad (22)$$

ε – аэрозоль немесе тұман бөлшектерін тұндыруға жұмсалатын энергия шығыны, Дж/м³;

A и k – шаңның дисперсті құрамымен анықталатын эмпирикалық тұрақтылар.

Қолданыстағы барлық дерлік технологиялық процестер мөлшері 0,1-10 мкм болатын ұсақ суспензиялы бөлшектерден тұратын аэрозольдердің пайда болу көздері болып табылады, оларды ұстау энергияны едәуір тұтынумен байланысты.

Жылу және масса алмасу процестеріне ұқсас, энергетикалық әдіс бойынша тазарту дәрежесін тасымалдау бірліктерінің санымен байланыстыруға болады N :

$$n = 1 - \exp(-N), \quad (23)$$

Жүргізілген бағалау есептеулері 2-кестеде келтірілген.

Әдеби деректерді өңдеу [2, 8-12] мәнін анықтауға мүмкіндік береді A және K байланысты:

$$N = A\varepsilon^k, \quad (24)$$

$A = 5,5 \cdot 10^{-5}$, $k = 1,2$ әк сублиматтары үшін, $A = 1,3 \cdot 10^{-2}$, $k = 0,6$ фосфор қышқылының тұманына арналған, $A = 2 \cdot 10^{-4}$, $k = 1,0$ мыс сульфаты шаңы үшін.

Газды тазарту тиімділігін есептеуде энергетикалық әдісті қолданған кезде дисперсті фазаны ұстауға тікелей жұмсалатын энергияның үлесін сенімді түрде анықтау қажет. Есептеу кезінде жергілікті қарсылықтарға энергия шығынын болдырмау керек. Мәселен, мысалы, Вентури құбырлары бар газ жуғыштарды айтарлықтай қателіксіз есептеу кезінде барлық энергия газды тазартуға жұмсалады деп қабылдауға болады. Көбік қабаты бар құрылғылар үшін құрғақ пластинаның кедергісін болдырмай, тек газ-сұйық қабаттың гидравликалық кедергісін ескеру қажет.

Шаңды ұстау процесін сипаттау үшін біз дамыған фазааралық бетті құруға газ-сұйықтық ағынының энергия

шығындарын анықтауға негізделген энергетикалық тәсілді ұсынамыз. Параметрдің энергиясын есептеу тендеу бойынша жүзеге асырылады:

$$\varepsilon = \frac{\Delta P_L - \Delta P_c}{\Delta P_L}, \quad (25)$$

ΔP_c , ΔP_L – құрғақ және суармалы байланыс аймағының гидравликалық кедергісі, Па.

Өрнектерді ауыстыру ΔP_c , ΔP_L және бұл тендеуді түрлендіре отырып, біз аламыз:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\xi_c}{\xi_L}, \quad (26)$$

ξ_c и ξ_L – құрғақ және суармалы саптаманың қарсылық коэффициенттері.

<1 мкм бөлшектерден газдарды тазарту тиімділігін модельдеуге жақын тәсілді қарастырыңыз. Ол үшін газдарды тазарту дәрежесін (ICP бөлу тиімділігі) қатынас арқылы тасымалдау бірліктерінің саны арқылы білдіреміз (23).

Өздеріңіз білетіндей, жұқа дисперсті аэрозоль бөлшектердің мөлшері 0,02-ден 1 мкм-ге дейін. Осындай кішкентай бөлшектер үшін кейбір жуықтауда масса алмасу теориясының сәйкес тендеулеріне ұқсас тендеулерді қолдануға болады.

Сепараторға кіре берісте газ ағынының ун концентрациясы, ал ук шығысында болсын. Ағынның ядросында концентрация разрядта, ал канал қабырғасында болады $y_{гр}$.

DF арнасының беткі элементі үшін масса ағыны мен масса тендеулерін белгілі формада жазуға болады:

$$j = -G_r dy. \quad (27)$$

$$j = \rho_r \beta_r (y_\infty - y_{гр}) dF. \quad (28)$$

β_r – газ фазасындағы масса беру коэффициенті; G_r – газ ағынының массалық шығыны.

$$\rho_r \beta_r (y_\infty - y_{гр}) dF = G_r dy. \quad (29)$$

$$\int_{y_k}^{y_H} \frac{dy}{y_\infty - y_{гр}} = \frac{\rho_r \beta_r F}{G_r} \quad (30)$$

$$N = \int_{y_k}^{y_H} \frac{dy}{y_\infty - y_{гр}} = \frac{\rho_r \beta_r F}{G_r} \quad (31)$$

$$N \approx \frac{\rho_r \beta_r F}{G_r} \quad (32)$$

Кесте 2

Table 2

Таблица 2

Тәуелділік бойынша бөлу тиімділігін есептеу (23)

Calculation of distribution efficiency based on dependence (23)

Расчет эффективности распределения по зависимости (23)

Тасымалдау бірліктерінің саны, N	0,5	1,0	2,0	2,3	3,1	3,5	3,9	4,6	5,1	6,9
Газды тазарту тиімділігі, η	0,39	0,63	0,86	0,90	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	0,999

Белгілі мәндерін біле отырып, кез-келген масса алмасу аппараттары үшін g мәні немесе олардың жылу беру коэффициентімен байланысын (32) теңдеу арқылы тасымалдау бірліктері санының мәнін бағалауға болады. Шаңды бөлудің немесе ұстаудың тиімділігін есептеудің бұл әдісі жұқа аэрозольге жарамды (10 мкм).

Мысал ретінде пішіннің өте аз кедергісімен (фронтальды кедергі) сипатталатын тегіс параллель саптамасы бар құрылғыны қарастырайық және барлық дерлік энергия шығындары үйкеліске кетеді. Бұл энергия шығындарының жоғары құнымен маңызды.

Күштер балансының шартын жазайық:

$$\tau_w F = \Delta P_{mp} S, \quad (33)$$

S – аппараттың көлденең қимасының ауданы, м².

Қабырғадағы тангенс кернеуін импульсті беру теңдеуі арқылы да жазуға болады:

$$\tau_w = \rho_r \gamma \Delta u_\infty = \rho_r \beta_r (u_\infty \pm u_{rp}), \quad (34)$$

«+» – қарсы ағым;

«-» – тікелей ағым.

(33) және (34) теңдеулерден біз табамыз

$$\beta_r = \frac{\Delta P_{mp} S}{\rho_r F (u_\infty \pm u_{rp})}. \quad (35)$$

Содан кейін тасымалдау бірліктерінің санын есептеуге арналған теңдеу (32) келесідей болады:

$$N = \frac{\Delta P_{mp} S}{G (u_\infty \pm u_{rp})}. \quad (36)$$

Тегіс каналдағы газ ағыны кезінде жылдамдық профилін параболалық заңмен және шамамен сипаттауға болады $u_\infty \cong 1.5 u_{cp}$.

(22) теңдеуден біз сепаратордың тегіс параллель арнасы бойымен қозғалған кезде субмикрондық өлшемдегі бөлшектерге қатысты өрнекті аламыз:

$$n = 1 - \exp\left(-\frac{\Delta P_{mp} S}{G (u_\infty \pm u_{rp})}\right), \quad (37)$$

үйкеліс қысымының жоғалуы ΔP_{mp} эксперименталды немесе белгілі өрнектер бойынша орналасқан.

$$\Delta P_{mp} = \lambda_{mp} \frac{l}{d_3} \frac{\rho_r u_{cp}^2}{2}, \quad (38)$$

λ_{mp} – үйкеліс коэффициенті (жергілікті кедергісіз);

$u_{cp} = \frac{G}{\rho_r S}$ – газдың орташа жылдамдығы, м/с.

Осылайша, аэрозольдің жұқа дисперсті бөлшектерін бөлу (тұндыру) тиімділігінің (10 мкм) газ фазасындағы масса беру коэффициентімен және аппараттың энергетикалық шығындарымен (гидравликалық кедергі) байланысы анықталды. Бұл әдіс шаңды немесе тұманды ұстау дәрежесін оңай орнатуға мүмкіндік береді.

Құрылымның сенімділігіне, қызмет көрсетудің қарапайымдылығына және материалдардың кең спектрін өңдеу мүмкіндігіне байланысты ауыл шаруашылығында, химия

және тамақ өнеркәсібінде қолданылатын кептіру қондырғыларының барлық конструкцияларының ішінде барабан агрегаттары ең кең таралған (50%-дан астам) болды.

Барабан аппараттары дисперсті материалдарды кептіруге арналған. Бұл құрылымдардың теріс белгісі – олар ауа бассейнін ластайтын шаң мен газдың көзі болып табылады. Осыған байланысты барабан аппаратынан кейін құрғақ шаң жинағыштар орнатылады: гравитациялық; орталықтан тепкіш (құрғақ және дымқыл), мата (жең) және электр сүзгілері. Сондықтан барабан аппаратының, оттықтың, тиеу және түсіру бункерінің, шаң жинағыштардың жиынтығы басқа қосалқы құрылымдармен бірге кептіру-барабан агрегаты деп аталады.

Өкінішке орай, осы уақытқа дейін мұндай кешеннің бірлігі оны есептеудің бірлігіне әсер еткен жоқ. Сонымен, шаң мен газ ұстағыштарды таңдау барабанның өзінде осы компоненттердің пайда болу заңдылықтарын ескермей жүзеге асырылады.

Барабан аппараты-аэрозоль ағынымен толтырылған цилиндрлік камера, онда барабанның ұзындығы бойынша газ бен шаң концентрациясы үнемі артады. Соңғы параметрді есептеу кезінде дизайнерлер аппараттың ішкі элементтерінде (саптамаларында) шаң бөлшектерінің коагуляциясы мен тұндыру механизмін есепке алмай, тасымалдау теориясынан шығады, бұл газ-шаң ағынындағы бөлшектердің дисперсиясына айтарлықтай әсер етеді.

Сондықтан тегіс элементтердегі аэрозоль ағынының бөлшектерін тұндыру механизмін қарастырыңыз. Цилиндрлік арналардың диаметрі аэрозоль ағынының DH бөлшектерінің мөлшерінен едәуір үлкен екенін ескере отырып, біз арналардың радиусы мен қисықтық бұрышын елемейміз.

Гравитациялық және инерциялық күштердің әсерінен шаң бөлшектерінің тұндыруының белгілі стохастикалық моделіне сүйене отырып, біз бөлшек жылдамдығының релаксация уақытын бағалау үшін теңдеулер аламыз:

$$\tau_p = \frac{d_q^2 \rho_q}{18 \rho_r v_r}, \quad (39)$$

τ_p – релаксация уақыты, с;

d_q – бөлшектердің диаметрі, м;

ρ_q и ρ_r – бөлшектер мен газ ағынының тығыздығы, кг/м³;

v_r – кинематикалық тұтқырлық, м²/с.

Өлшемсіз релаксация уақыты келесідей жазылады:

$$\tau^+ = \frac{\tau_p u_{cp}^2}{v_r}. \quad (40)$$

Біз ұсынған энергетикалық тәсілден динамикалық жылдамдықты анықтаймыз:

$$u_* = 1.8 \left(\frac{\Delta P u_{cp} v_r}{l \rho_r} \right)^{1/4}, \quad (41)$$

ΔP – қысым айырмашылығы саптама қабатында дисперсті фазаның болуын ескере отырып, Па;

l – арнаның ұзындығы, м;

u_{cp} – аэрозоль ағынының жылдамдығы, м/с;

v_r – кинематикалық тұтқырлық, м²/с.

Осы үш теңдеуден біз аэрозоль бөлшектерінің өлшемсіз релаксация уақытын аламыз:

$$\tau^+ = 0.18 \frac{d_q^2 \rho_v}{(\rho_r v_r) \sqrt{\Delta P u_{cp}}} \quad (42)$$

Жалпылама жұмыс [8] әр түрлі авторлардың келесі формулалары келтірілген:

1. Liu және Agarwal кезінде $\tau^+ < 10$

$$u_t^+ = 6 \cdot 10^{-4} (t^+)^2. \quad (43)$$

2. Mc Coy және Hanratty

$$u_t^+ = 3.25 \cdot 10^{-4} (\tau^+)^2 \text{ кезінде } \tau^+ \leq 22,9 \quad (44)$$

$$u_t^+ = 0.17 \text{ кезінде } \tau^+ > 22,9 \quad (45)$$

3. Ужова және Медникова

$$u_t^+ = 7,25 \cdot 10^{-4} \cdot k \text{ кезінде } k \leq 16,6 \quad (46)$$

$$u_t^+ = 0,2 \text{ кезінде } k \leq 16,6 \quad (47)$$

$$\text{қайда } k = \left[\frac{\tau_p u_*^2}{v_r} \cdot \left(1 + \frac{\tau_p u_*}{0,05 d_s} \right)^{-1} \right]^2 \quad (48)$$

Осы тәуелділіктерден көрініп тұрғандай u_t бөлу жылдамдығы көбінесе u^* динамикалық жылдамдығының мәніне немесе тангенс кернеуіне байланысты $\tau_w \left(u_* = \sqrt{\tau/\rho} \right)$.

Шартты орындау үшін формулада ($\text{inf}^+ < 10$) есептеулер бойынша саптамалары бар барабанда шаң бөлшектерінің мөлшері 10 мкм-ден аз болуы керек екендігі анықталды (1-сурет). 0,1 мкм бөлшектердің өлшемсіз релаксация уақыты өте аз.

Саптамалары бар барабанға арналған бөлшектердің турбулентті тұндыру жылдамдығы:

$$u_t = 0,36 \cdot 10^{-4} \frac{d_q^4 \rho_v^2}{v_r^{2,75} \rho_r^{3,25}} \left(\frac{\Delta P u_{cp}}{l} \right)^{4/5} \quad (49)$$

u_t өрнек көмегімен жазылған (41).

Ұсақ бөлшектерге арналған саптамалары бар аппараттардағы сепарацияның тиімділігі:

$$n_t = 1 - \exp \left[-A \cdot \frac{d_q^4 \rho_v^2 \Delta P^{1,25}}{v_r^{2,75} \rho_r^{3,25} d_s} \left(\frac{u_k}{l} \right)^{0,25} \right], \quad (50)$$

A – пропорционалдылық коэффициенті;

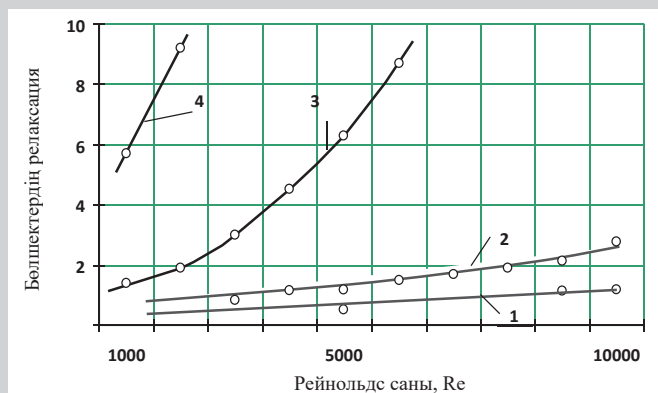
d_q и ρ_v – шаң бөлшектерінің мөлшері мен тығыздығы;

v_r и ρ_r – газдың (салқындатқыштың) кинематикалық тұтқырлығы мен тығыздығы;

ΔP – барабан аппаратының немесе зигзаг шаң жинағыштың саптамалары арасындағы арналар арқылы газ ағынының немесе ағынының өтуі кезіндегі үйкеліске төзімділік;

u_k – арналардағы газ-ауа ағындарының орташа жылдамдығы;

l – арнаның ұзындығы;



Жұмыс ортасы: ауа-су тамшылары.
Бөлшектердің диаметрі, d_q : 1 – 1 мкм; 2 – 2 мкм;
3 – 5 мкм; 4 – 10 мкм, $u_{cp} = 1 \div 10$ м/с, $L = 1$ м.

Сурет 1. Дөңгелек арналы барабандағы Рейнольдс санына бөлшектердің өлшемсіз релаксация уақытының тәуелділігі.

Figure 1. Dependence of the dimensionless relaxation time of particles on the Reynolds number in a circular channel drum.

Рис. 1. Зависимость времени безразмерной релаксации частиц от числа Рейнольдса в круговом канальном барабане.

d_s – b өлшемдері бар төртбұрышты арна үшін белгілі арақатынас бойынша анықталатын арнаның эквивалентті диаметрі в разряд (b – арнаның ені, B – түсіру бункерінің ені).

Бұл өрнек аэрозоль бөлшектері бар газ ағынының режимдік, құрылымдық саптамалары мен физикалық қасиеттерінің әртүрлі саптамалары бар барабандағы бөлу тиімділігіне әсерін тез бағалауға мүмкіндік береді.

Аэрозольді бөлудің математикалық моделі экологиялық модернизацияда немесе кептіру-барабан агрегаттарын жобалауда әртүрлі құрылымдық элементтердің тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

Қорытынды

Осы зерттеудің нәтижелері бойынша көрсетілген факторларды соңғы көрсеткішке өзгертудің маңыздылығы туралы қорытынды жасауға болады. Кептіргіш барабан аппаратының элементтеріне шаң бөлшектерін тұндырудың негізгі механизмдері орнатылған. Аэрозоль ағынынан шаң бөлшектерін бөлу тиімділігін есептеуге энергетикалық тәсіл ұсынылды. Барабанды кептіргіштің тегіс цилиндрлік арналарында шаң бөлшектерінің тұндыру тиімділігін бағалау үшін жалпылама теңдеу берілген. Аэрозоль ағынын бөлудің эзірленген ғылыми негіздері Технологиялық жабдықты экологиялық жаңғырту кезінде әртүрлі режимдік және конструктивтік шешімдерді пайдаланудың тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Yessenov M.K. Тау-кен және өңдеу өндірісінің шаң-тозаң деңгейін төмендету үшін технологиялық жабдықтарды экологиялық жаңғырту аспектілері. / M.K. Yessenov, L.I. Ramatullaeva, A.S. Kolenikov, G.K. Ivakhniyuk. // MIAB. Тау-кен ақпараттық-аналитикалық бюллетень. 2023. №10. Б. 136-148 (ағылшын тілінде)
2. Park S. Жетілдірілген аэрозоль бөлшектерін түсіру үшін жетілдірілген сүзгі материалдары. / S. Park, K. Lee. // Экологиялық инженерия технологиясы журналы. 2020. №5 (4). Б. 167-174 (ағылшын тілінде)
3. Kim J. Ауа сапасын бақылау үшін аэрозоль бөлшектерін ұстау технологияларындағы жетістіктер. / J. Kim, C. Yoon. // Таза энергия және қоршаған орта журналы. 2017. №3 (1). Б. 25-31 (ағылшын тілінде)
4. Абрамович Г.Н. Қолданбалы газ динамикасы: М.: Ғылым, 1976, Б. 110 (орыс тілінде)
5. Лойцянский Л.Г. Ламинарлы шекара қабаты: М.: Физматгиз, 1962, Б. 55-58 (орыс тілінде)
6. Авдудевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. Авиациялық және зымыран-ғарыш техникасындағы жылу беру негіздері: М.: Машина Жасау, 1975, Б. 214 (орыс тілінде)
7. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Захарченко В.Ф. Қолданбалы аэрогазодинамика негіздері: М.: Жоғары мектеп, 1991, Б. 93 (орыс тілінде)
8. Медников Е.П. Турбулентті тасымалдау және аэрозольдерді тұндыру: М.: Ғылым, 1980, Б. 176 (орыс тілінде)
9. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Өнеркәсіптік газдарды дайындау тазалау: М.: Химия, 1975, Б. 216 (орыс тілінде)
10. Өнеркәсіптік газдарды шаңнан тазарту. / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. М.: Химия, 1981, 390 б. (орыс тілінде)
11. Идельчик И.Е. Гидравликалық қарсылық анықтамалығы: М.; Л.: Мемэнергоиздат, 1960, Б. 464 (орыс тілінде)
12. Идельчик И.Е. Технологиялық аппараттардың аэрогидродинамикасы (Аппараттардың көлденең қимасы бойынша ағынды жеткізу, бұру және тарату): М.: Машина жасау, 1983, Б. 351 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Yessenov M.K. Aspects of ecological modernization of technological equipment to reduce the level of dust from mining and processing production. / M.K. Yessenov, L.I. Ramatullaeva, A.S. Kolenikov, G.K. Ivakhniyuk. // MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023. №10. P. 136-148 (in English)
2. Park S. Advanced filtering materials for enhanced aerosol particle capture. / S. Park, K Lee. // Journal of Environmental Engineering Technology. 2020. №5 (4). P. 167-174 (in English)
3. Kim J. Advances in aerosol particle capture technologies for air quality control. / J. Kim, C.Yoon. // Journal of Clean Energy and Environment. 2017. №3 (1). P. 25-31 (in English)
4. Abramovich G.N. Prikladnaya gazovaya dinamika: M.: Nauka, 1976, S. 110 [Abramovich G.N. Applied gas dynamics: M.: Science, 1976, P. 110] (in Russian)
5. Loitsyanskii L.G. Laminaryi pogranchnyy sloi: M.: Fizmatgiz, 1962, S. 55-58 [Loitsyansky L.G. Laminar boundary layer: M.: Fizmatgiz, 1962, P. 55-58] (in Russian)
6. Avduevskii V.S., Galitseiskii B.M., Glebov G.A. Osnovy teploperedachi v aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhnike: M.: Mashinostroenie, 1975, S. 214 [Avduevsky V.S. Galitseysky B.M., Glebov G.A. Fundamentals of heat transfer in aviation and rocket and space technology: M.: Mechanical Engineering, 1975, P. 214] (in Russian)
7. Osnovy prikladnoi aerogazodinamiki. / N.F. Krasnov, V.N. Koshevoi, V.F. Zakharchenko. M.: Vyssh. shkola, 1991, S. 93 [Krasnov N.F., Koshevoy V.N., Zakharchenko V.F. Fundamentals of applied aerogas dynamics: M.: Higher school, 1991, P. 93] (in Russian)
8. Mednikov E.P. Turbulentnyi perenos i osazhdenie aerezolei: M.: Nauka, 1980, S. 176 [Mednikov E.P. Turbulent transport and deposition of aerosols: M.: Science, 1980, P. 176] (in Russian)
9. Uzhov V.N., Val'dberg A.Yu. Podgotovka promyshlennykh gazov k ochistke: M.: Khimiya, 1975, S. 216 [Uzhov V.N., Valdberg A.Yu. Preparation of industrial gases for cleaning: M.: Chemistry, 1975, P. 216] (in Russian)
10. Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli. / V.N. Uzhov, A.Yu. Val'dberg, B.I. Myagkov, I.K. Reshidov. M.: Khimiya, 1981, 390 s. [Purification of industrial gases from dust. / V.N. Uzhov, A.Yu. Valdberg, B.I. Myagkov, I.K. Reshidov. M.: Chemistry, 1981, 390 p.] (in Russian)
11. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam: M.; L.: Gosenergoizdat, 1960, S. 464 [Idelchik I.E. Handbook of hydraulic resistance: M.; L.: Gosenergoizdat, 1960, P. 464] (in Russian)

12. *Idel'chik I.E. Aerogidrodinamika tekhnologicheskikh apparatov (Podvod, otvod i raspredelenie potoka po secheniyu apparatov): M.: Mashinostroenie, 1983, S. 351 [Idelchik I.E. Aerohydrodynamics of technological devices (Inlet, outlet and flow distribution across the cross-section of the apparatus): M.: Mechanical Engineering, 1983. P. 351] (in Russian)*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Yessenov M.K. Аспекты экологической модернизации технологического оборудования для снижения уровня запыленности горнодобывающего и перерабатывающего производства. / M.K. Yessenov, L.I. Ramatullaeva, A.S. Kolenikov, G.K. Ivakhniyuk. // МИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. №10. С. 136-148 (на английском языке)*
2. *Park S. Усовершенствованные фильтрующие материалы для улучшенного улавливания аэрозольных частиц. / S. Park, K. Lee. // Журнал технологий экологической инженерии. 2020. №5 (4). С. 167-174 (на английском языке)*
3. *Kim J. Достижения в области технологий улавливания аэрозольных частиц для контроля качества воздуха. / J. Kim, C. Yoon. // Журнал чистой энергии и окружающей среды. 2017. №3 (1). С. 25-31 (на английском языке)*
4. *Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика: М.: Наука, 1976, С. 110 (на русском языке)*
5. *Лойцянский Л.Г. Ламинарный пограничный слой: М.: Физматгиз, 1962, С. 55-58 (на русском языке)*
6. *Авдеевский В.С., Галицейский Б.М., Глебов Г.А. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: М.: Машиностроение, 1975, С. 214 (на русском языке).*
7. *Основы прикладной аэрогазодинамики. / Н.Ф. Краснов, В.Н. Кошевой, В.Ф. Захарченко. М.: Высш. школа, 1991, С. 93 (на русском языке)*
8. *Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей: М.: Наука, 1980, С. 176 (на русском языке)*
9. *Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Подготовка промышленных газов к очистке: М.: Химия, 1975, С. 216 (на русском языке)*
10. *Очистка промышленных газов от пыли. / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мяжков, И.К. Решидов. М.: Химия, 1981, 390 с. (на русском языке)*
11. *Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям: М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960, С. 464 (на русском языке)*
12. *Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов): М.: Машиностроение, 1983, С. 351 (на русском языке)*

Авторлар туралы мәліметтер:

Есенов М.К., М. Әуезов ағ. Оңтүстік Қазақстан университетінің КеАҚ «Тіршілік қауіпсіздігі және қоршаған ортаны қорғау» кафедрасының докторанты (Шымкент қ., Қазақстан), kticz@bk.ru; <https://orcid.org/0009-0009-9925-5049>

Раматуллаева Л.И., М. Әуезов ағ. Оңтүстік Қазақстан университетінің КеАҚ «Тіршілік қауіпсіздігі және қоршаған ортаны қорғау» кафедрасының байланысты профессоры, т.ғ.к. (Шымкент қ., Қазақстан), Ramatullaeva_l@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1771-9903>

Волненко А.А., М. Әуезов ағ. Оңтүстік Қазақстан университетінің КеАҚ «Механика және машина жасау» ҒЗИ директоры, т.ғ.д., профессор (Шымкент қ., Қазақстан), nii_mm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6800-9675>

Ивахнюк Г.К., Санкт-Петербург мемлекеттік технологиялық институтының профессоры 2328 (Санкт-Петербург қ., Ресей), fireside@inbox.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3983-2328>

Information about authors:

Yessenov M.K., doctorant of the Department of «Life Safety and Environmental Protection» of the NCJCK of the South Kazakhstan University named after M. Aueyev (Shymkent, Kazakhstan)

Ramatullaeva L.I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Life Safety and Environmental Protection» of the NCJCK of the M. Aueyev South Kazakhstan University (Shymkent, Kazakhstan)

Volnenko A.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Research Institute «Mechanics and Mechanical Engineering» of the NCJCK of the M. Aueyev South Kazakhstan University (Shymkent, Kazakhstan)

Ivakhniyuk G.K., Professor St.-Petersburg State Technological Institute (St. Petersburg, Russia)

Информация об авторах:

Есенов М.К., докторант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защиты окружающей среды» НАО Южно-Казахстанского университета им. М. Ауезова (г. Шымкент, Казахстан)

Раматуллаева Л.И., к.т.н, асоц. профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защиты окружающей среды» НАО Южно-Казахстанского университета им. М. Ауезова (г. Шымкент, Казахстан)

Волненко А.А., д.т.н, профессор, директор НИИ «Механика и машиностроение» НАО Южно-Казахстанского университета им. М. Ауезова (г. Шымкент, Казахстан)

Ивахнюк Г.К., профессор Санкт-Петербургского государственного технологического института (г. Санкт-Петербург, Россия)