

УДК 621.928.1

А. М. Волк

Белорусский государственный технологический университет

ТОНКОДИСПЕРСНАЯ СЕПАРАЦИЯ ЖИДКОСТИ

Процессы сепарации газожидкостных потоков имеют важное значение при массообмене, выпарке, ректификации, мокрой очистке газа, промышленной подготовке добываемого природного газа. Разделения многофазных систем выступают составной частью многих технологических процессов в химической, пищевой, нефтехимической, микробиологической, энергетической и других отраслях промышленности. В этих процессах определяющим фактором является движение частиц в сплошной газовой среде.

В данной работе исследована гидродинамика закрученного газового потока в сепараторах элементного типа, рассмотрены действующие на жидкую сферическую частицу силы. Составлена математическая модель процесса сепарации в газожидкостных потоках, позволяющая определить минимальный размер улавливаемых капель с учетом изменения конструктивных, технологических и реологических параметров. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании сепараторов.

Ключевые слова: сепарация, закрученный газожидкостный поток, действующие силы, математическая модель, минимальный размер.

A. M. Volk

Belarusian State Technological University

LIQUID SEPARATION

The separation of gas-liquid flows is important for mass transfer, recovery, distillation, wet gas purification, field preparation of produced natural gas. Separations of multiphase systems are an integral part of many technological processes in the chemical, food, petrochemical, microbiological, energy and other industries. In these processes, the determining factor is the movement of particles in a continuous gas medium.

In this work, the hydrodynamics of a swirling gas flow in elementary separators is investigated, the forces acting on a liquid spherical particle are considered. A mathematical model of the separation process in gas-liquid flows has been compiled, which allows to determine the minimum size of trapped drops, taking into account changes in structural, technological and rheological parameters. The obtained results can be used in the design of separators.

Key words: separation, swirling gas-liquid flow, acting forces, mathematical model, minimum size.

Введение. Массообменные аппараты широко применяются в химической и нефтехимической промышленности. Одной из основных проблем этих аппаратов является капельный унос жидкой фазы. Межтарельчатый унос снижает эффективность массопередачи, а унос между аппаратами нарушает работу технологических установок в целом. Задача предотвращения уноса капель жидкости с газовым потоком актуальна также при выпарке, ректификации, мокрой очистке газов, промышленной подготовке добываемого природного газа [1].

Проблемы уноса могут быть успешно решены при использовании центробежных сепарационных устройств. Основным силовым фактором в них является инерционная центробежная сила, значительно превышающая силу тяжести, что предопределяет их высокую эффективность. К тому же они компактны и менее металлоемки [2].

На рис. 1 схематично представлены некоторые конструкции аппаратов элементного типа,

разработанные в Белорусском государственном технологическом университете [3].

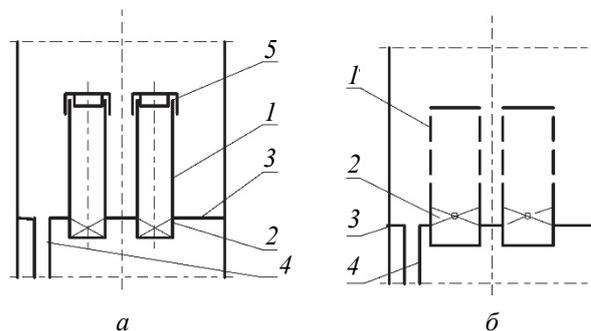


Рис. 1. Центробежные сепараторы элементного типа:

- а* – сепарационные элементы с отводом жидкости через зазор в верхней части; *б* – сепарационные элементы с отводом жидкости через щели сетчатого патрубка;
 1 – патрубок; 2 – многолопастный завихритель;
 3 – тарелка; 4 – сливная труба;
 5 – отбойный колпачок

Центробежные сепарирующие устройства включают центробежные патрубки, установленные на общей тарелке. В нижней части они снабжены завихрителем газового потока, в верхней – устройством для отделения жидкой фазы. Центробежные сепарационные элементы работают в режиме восходящего прямотока. Завихрители чаще всего выполняются лопастными или в виде тангенциальных прорезей. Устройства для отделения жидкостей – колпачок, боковые прорези, сетчатая поверхность.

В теоретических работах излагаются вопросы движения частиц в закрученном газовом потоке без учета изменения скорости газа по радиусу элемента и других факторов, влияющих на эффективность сепарации [4].

В [5] дан более глубокий анализ сил, действующих на каплю при движении ее в закрученном газовом потоке, однако решение уравнений выполнено применительно к процессам массообмена только для крупных капель ($>0,3$ мм).

Процессы тонкой сепарации исследованы недостаточно. Возникает необходимость расширить диапазон размеров исследуемых частиц при различных геометрических размерах сепаратора для газожидкостных потоков с различными свойствами, выполнить расчет траектории капель малого размера.

Для исследования процессов разделения многофазных потоков необходимо математическое моделирование движения закрученного газового потока как внутри непроницаемого цилиндра, так и при оттоке газа на проницаемых поверхностях. Следует также исследовать движение жидких частиц в потоке газа.

Математическая модель и результаты расчетов. Принимаем, что частицы имеют сферическую форму радиусом a , плотностью ρ_j и массой m . Скорость частицы обозначим через V , а скорость газового потока – через W .

Для исследования гидродинамики установившегося движения закрученного газового потока внутри цилиндра радиусом R рассмотрим уравнения Навье – Стокса и уравнение неразрывности в цилиндрической системе координат r, φ, z [6–8]. Для осесимметричных потоков принимаем $\partial W / d\varphi = 0$. При движении закрученных потоков внутри цилиндра радиальная составляющая скорости W_r незначительна и, как правило, в расчетах не учитывается. Поэтому можно принять $W_r = 0$. Для газовых потоков также не учитывается сила тяжести. Тогда из уравнения неразрывности следует, что

$$\frac{\partial W_z}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

Это означает, что профиль осевой составляющей скорости не изменяется по длине цилиндра.

Принятые условия соответствуют коротким трубам и подтверждаются экспериментальными исследованиями [9]. В связи с этим уравнения Навье – Стокса преобразуются к виду [10]

$$\frac{dP}{dr} = \rho \frac{W_\varphi^2}{r}, \quad (2)$$

$$\frac{d^2 W_\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} - \frac{W_\varphi}{r^2} = 0. \quad (3)$$

За граничные условия принимаем

$$W_\varphi = 0 \text{ при } r = R, \quad (4)$$

$$\bar{W}_\varphi = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R W_\varphi \cdot 2\pi r dr = 2 \int_0^1 W_\varphi \tilde{r} d\tilde{r}, \quad (5)$$

где $\tilde{r} = r / R$.

С учетом граничных условий и непрерывности профиля получим

$$W_\varphi = \begin{cases} \frac{3}{4} \bar{W}_\varphi \frac{1 + \tilde{r}_{\max}}{\tilde{r}_{\max}^2} \tilde{r}, & 0 \leq \tilde{r} < \tilde{r}_{\max}, \\ \frac{3}{4} \frac{\bar{W}_\varphi}{1 - \tilde{r}_{\max}} \left(\frac{1}{\tilde{r}} \right), & \tilde{r}_{\max} \leq \tilde{r} \leq 1, \end{cases} \quad (6)$$

где \tilde{r}_{\max} – значение r , соответствующее максимуму W_φ .

Подставляя (6) в выражение (2) и интегрируя последнее, находим разность давлений, действующих на стенку цилиндра, создаваемых закрученным газовым потоком:

$$\begin{aligned} \Delta P &= \rho \int_0^1 \frac{W_\varphi^2}{\tilde{r}} d\tilde{r} = \\ &= \frac{9}{16} \left(1 + \frac{1}{\tilde{r}_{\max}} + \frac{1}{2\tilde{r}_{\max}^2} + 2 \ln \tilde{r}_{\max} - \frac{\tilde{r}_{\max}^2}{2} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Для случая проницаемой поверхности, когда максимум расположен достаточно близко к стенке цилиндра, т. е. $\tilde{r}_{\max} \cong 1$:

$$W_\varphi = \frac{3}{2} \bar{W}_\varphi \tilde{r}, \quad \Delta P = \frac{9}{8} \rho \bar{W}_\varphi^2. \quad (8)$$

Касательная составляющая \bar{W}_φ средней скорости \bar{W} газового потока зависит от ее среднерасходной составляющей \bar{W}_z в элементе и угла закрутки β потока статическим закручивателем [6]. Можно принять, что

$$\bar{W}_\varphi = \bar{W}_z \operatorname{tg} k \beta, \quad (9)$$

где k – коэффициент, учитывающий отклонение угла закрутки потока от угла наклона лопастей завихрителя.

Анализ экспериментальных данных для центробежных элементов с лопастным завихрителем, имеющим угол наклона лопастей к горизонту в пределах 30–45°, дает значение $k = 0,83$ [6].

Рассмотрим осевую составляющую закрученного газового потока в проницаемом цилиндрическом элементе. Уравнение неразрывности имеет решение $W_r r = \text{const}$. При скорости оттока на проницаемой поверхности W_0 радиальная скорость будет $W_r = W_0 R / r$, градиент давления пропорционален перепаду давления по длине $\partial P / dz = -(P_1 - P_2) / L$ и уравнение принимает вид

$$\frac{d^2 W_z}{dr^2} - \frac{1}{r} \left(\frac{W_0 R}{v} - 1 \right) \frac{dW_z}{dr} = - \frac{1}{\mu} \frac{P_1 - P_2}{L}. \quad (10)$$

В качестве граничных условий зададим нулевую скорость на поверхности и среднюю расходную скорость по поперечному сечению:

$$W_z|_{r=R} = 0; \quad \bar{W}_z = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R W_z \cdot 2\pi r dr = 2 \int_0^1 W_z \tilde{r} d\tilde{r}. \quad (11)$$

Обозначив $\alpha = W_0 R / v$, непосредственным интегрированием получим

$$W_z = \bar{W}_z (1 - \tilde{r}^\alpha) + \frac{(P_1 - P_2) R}{4\rho L W_0} \left(1 - 2\tilde{r}^2 - \frac{3}{2}\tilde{r}^\alpha \right).$$

С учетом касательных напряжений τ на проницаемой поверхности [10]

$$\tau|_{r=R} = -\rho \bar{W}_z W_0 = - \frac{P_1 - P_2}{2L} R \quad (12)$$

получается следующая зависимость для осевой составляющей закрученного газового потока в проницаемом цилиндре:

$$W_z = \bar{W}_z \left(\frac{1}{2} + \tilde{r}^2 - \frac{3}{2}\tilde{r}^\alpha \right). \quad (13)$$

Скорость оттока сплошной среды определяется свойствами проницаемой поверхности и перепадом давления на ней [11]. При турбулентном режиме движения среды через отверстия в стенке на основании уравнения Бернулли получаем квадратичный закон [12]:

$$W = \gamma \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}. \quad (14)$$

Коэффициент расхода γ зависит от свойств проницаемой поверхности. И. Е. Идельчиком [13] при обработке экспериментальных данных получена формула зависимости коэффициента расхода γ от относительной площади \bar{f} отверстий:

$$\gamma^{-2} = \frac{\left(0,707\sqrt{1-\bar{f}} + 1 + \bar{f} \right)^2}{\bar{f}^2}. \quad (15)$$

Изменение средней осевой составляющей скорости газового потока в проницаемом элементе описывается уравнением

$$d\bar{W}_z = - \frac{2\pi R \bar{W}_z dz}{\pi R^2} = - \frac{2\bar{W}_z}{R} dz. \quad (16)$$

В основном потоке, вне пограничного слоя, или в непроницаемом элементе принимая составляющую \tilde{r}^α , равной нулю, получим

$$W_z = \bar{W}_z \left(\frac{1}{2} + \tilde{r}^2 \right). \quad (17)$$

Данная зависимость согласуется с результатами, описанными в работе [14].

Одной из задач исследования процесса разделения газожидкостных потоков в центробежных элементах является определение траектории движения капель сепарируемой жидкой фазы.

Рассмотрим движение одиночной частицы диаметром a и массой m в цилиндрической системе координат r, φ, z . Ось Oz направлена вертикально вверх по оси сепарационного элемента.

Масса частицы будет:

$$m = \rho \cdot \frac{4}{3} \pi a^3. \quad (18)$$

Пусть V_r, V_φ, V_z – радиальная, касательная и осевая составляющие скорости движущейся частицы соответственно.

Уравнения движения одиночной частицы имеют вид

$$\begin{cases} m \left(\frac{dV_r}{dt} - \frac{V_\varphi^2}{r} \right) = F_r, \\ m \left(\frac{dV_\varphi}{dt} + 2 \frac{V_\varphi V_r}{r} \right) = F_\varphi, \\ m \frac{dV_z}{dt} = F_g + F_z. \end{cases} \quad (19)$$

В составленную систему уравнений входит сила тяжести

$$\vec{F}_g = mg \quad (20)$$

и составляющие F_r, F_φ, F_z силы гидродинамического воздействия

$$\vec{F} = \zeta \cdot \frac{1}{2} \rho |\vec{W} - \vec{v}| (|\vec{W} - \vec{v}|) \pi a^2. \quad (21)$$

Остальные силы как минимум на порядок меньше, и ими можно пренебречь [15, 16].

Коэффициент сопротивления сферической частицы зависит от числа Рейнольдса [17]:

$$\text{Re}_a = \frac{2a|\vec{W} - \vec{V}|}{\nu} \quad (22)$$

При движении частицы в вязкой среде наблюдаются ламинарный, переходный турбулентный и турбулентный режимы обтекания частицы. Коэффициент сопротивления соответственно определяется следующими зависимостями:

$$\zeta = \begin{cases} 24\text{Re}_a^{-1}, & \text{Re}_a < 2, \\ 18,5\text{Re}_a^{-0,6}, & 2 \leq \text{Re}_a \leq 500, \\ 0,44, & \text{Re}_a > 500. \end{cases} \quad (23)$$

Расчет траектории движения частицы.

Полученный анализ сил позволил рассчитать траекторию движения жидких частиц в газовом потоке и оценить эффективность сепарации.

Система дифференциальных уравнений (19) решалась с использованием стандартных операторов системы компьютерной математики Mathcad. Составленная программа позволяла учесть как геометрические параметры сепараторов, так и гидродинамические факторы процесса.

Расчетные данные выводились в виде графиков и таблиц.

При решении дифференциальных уравнений определялся минимальный диаметр капель, которые могут достигнуть стенки сепарационного элемента в зависимости от диаметра элемента D , длины элемента L , угла наклона лопастей завихрителя β , средней расходной скорости газа в элементе \bar{W}_z , вязкости газа μ , плотности газа ρ_r и жидкости $\rho_{ж}$. При выполнении расчетов были приняты следующие значения: $D = 0,1 - 0,5$ м; $L = 0,3 - 1,0$ м; $\beta = 30^\circ$; $\rho_r = 0,6$ кг/м³; $\mu = 0,000013$ Нс/м²; $\rho_{ж} = 1200$ кг/м³.

Результаты решения уравнений (1) представлены на рис. 2, 3.

Заключение. Исследовано влияние геометрических параметров сепарационного элемента и физико-химических свойств жидкости и газа на минимальный диаметр улавливаемых капель. Согласно рис. 2, диаметр и длина сепарационного элемента оказывают наиболее сильное воздействие на размер капель, достигающих стенки патрубка. Из рис. 3 следует, что угол наклона лопастей и вязкость газового потока также влияют на размер осаждаемых капель, в то время как скорость газа в элементах, плотность газа и жидкости оказывают незначительное влияние.

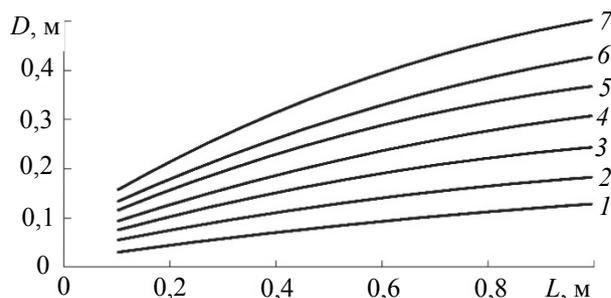


Рис. 2. Зависимость минимального диаметра улавливаемых капель от геометрических размеров сепарационного элемента:

1 – 3 мкм; 2 – 5 мкм; 3 – 7 мкм; 4 – 9 мкм; 5 – 11 мкм; 6 – 13 мкм; 7 – 25 мкм

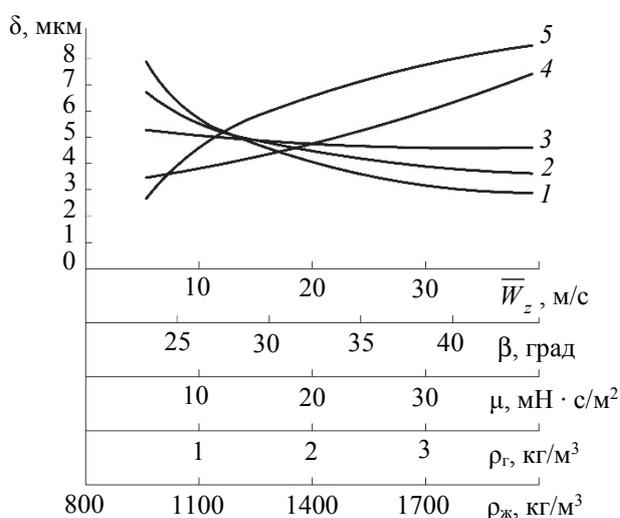


Рис. 3. Зависимость минимального диаметра улавливаемых капель от различных параметров:

1 – \bar{W}_z ; 2 – $\rho_{ж}$; 3 – ρ_r ; 4 – β ; 5 – μ

Полученные результаты могут быть использованы для исследования процессов разделения двухфазных потоков в вихревых аппаратах.

Обозначения. a – диаметр частицы, м; R – радиус цилиндра, м; D – диаметр цилиндра, м; L – длина цилиндрического элемента, м; F_ϕ, F_r, F_z – составляющие силы гидродинамического воздействия, Н; g – ускорение свободного падения, м/с²; m – масса частицы, кг; $\tilde{r} = r/R$ – безразмерная радиальная координата; Re – число Рейнольдса; t – время, с; V_ϕ, V_z, V_r – тангенциальная, осевая и радиальная составляющие скорости движущейся частицы соответственно, м/с; W_ϕ, W_z, W_r – тангенциальная, осевая и радиальная составляющие скорости газового потока соответственно, м/с; \bar{W}_z – средняя скорость газа, м/с; \bar{W}_ϕ – касательная составляющая средней скорости газа, м/с; ΔP – перепад давления, Па/м; γ – коэффициент расхода; \bar{f} – относительная площадь отверстий проницаемого элемента; β – угол; k – коэффициент; $\pi = 3,14159\dots$ – отношение длины

окружности к диаметру; ζ – коэффициент сопротивления; μ – коэффициент динамической вязкости, $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$; ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_r – плотность по-

тока газа, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность частицы жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ – касательные напряжения, $\text{Н}/\text{м}^2$; φ, r, z – цилиндрическая система координат.

Список литературы

1. Трифонов В. П. Сепарация газа и сокращение потерь нефти. Казань: Фен, 2002. 408 с.
2. Шкоропад Д. Е., Новиков О. П. Центрифуги и сепараторы для химических производств. М.: Химия, 1987. 256 с.
3. Левданский Э. И., Левданский А. Э. Высокоэффективные проточные процессы и аппараты. Минск: БГТУ, 2001. 234 с.
4. Ушаков С. Г., Зверев Н. И. Инерционная сепарация пыли. М.: Энергия, 1974. 168 с.
5. Медников Е. М. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1981. 176 с.
6. Марков В. А., Волк А. М., Ершов А. И. Исследование оттока жидкости через отверстия прямоточно-центробежного элемента // Инженерно-физический журнал. 1991. Т. 61, № 1. С. 82–87.
7. Волк А. М., Терешко Е. В. Анализ сил, действующих на твердую частицу в сплошном потоке // Труды БГТУ. 2015. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 10–14.
8. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред: в 2 ч. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с. Ч. 2. 360 с.
9. Кутепов А. М., Латкин А. С. Вихревые процессы для модификации дисперсных систем. М.: Наука, 1992. 250 с.
10. Гольдштик М. А. Вихревые потоки. Новосибирск: Наука, 1981. 366 с.
11. Сергеев С. П., Дильман В. В., Генкин В. С. Описание движения потока в канале с проницаемыми стенками // Теоретические основы химической технологии. 1971. Т. 5, № 4. С. 583–585.
12. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: в 2 кн. М.: Химия, 1981. 812 с. (Серия «Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии».)
13. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 560 с.
14. Щукин В. К., Халатов А. А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах. М.: Машиностроение, 1982. 199 с.
15. Медников Е. М. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1981. 176 с.
16. Горбис З. Р., Спокойный Ф. Е. Качественный анализ уравнений осредненного движения твердых частиц в турбулентном потоке // Теоретические основы химической технологии. 1978. Т. 12, № 5. С. 729–734.
17. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971. 536 с.

References

1. Trifonov V. P. *Separatsiya gaza i sokrashcheniye poter' nefiti* [Gas separation and reduction of oil losses]. Kazan, Fen Publ., 2002. 408 p.
2. Shkoropad D. E., Novikov O. P. *Tsentrifugi i separatory dlya khimicheskikh proizvodstv* [Centrifuges and separators for chemical production]. Moscow, Khimiya Publ., 1987. 256 p.
3. Levdansky E. I., Levdansky A. E. *Vysokoeffektivnyye protochnyye protsessy i apparaty* [Highly efficient flow processes and apparatuses]. Minsk, BGTU Publ., 2001. 234 p.
4. Ushakov S. G., Zverev N. I. *Inertsionnaya separatsiya pyli* [Inertial dust separation]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 168 p.
5. Mednikov E. M. *Turbulentnyy perenos i osazhdeniye aerorozoley* [Turbulent transport and deposition of aerosols]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 176 p.
6. Markov V. A., Volk A. M., Ershov A. I. Investigation of the outflow of fluid through the openings of a straight-flow centrifugal element. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physics Journal], 1991, vol. 61, no. 1, pp. 82–87 (In Russian).
7. Volk A. M., Tereshko E. V. Analysis of forces acting on a solid particle in a continuous stream. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 10–14 (In Russian).
8. Nigmatullin R. I. *Dinamika mnogofaznykh sred: v 2 chastyakh* [Dynamics of multiphase media: in 2 parts]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Part 1. 464 p. Part 2. 360 p.
9. Kutepov A. M., Latkin A. S. *Vikhrevyye protsessy dlya modifikatsii dispersnykh sistem* [Vortex processes for the modification of disperse systems]. Moscow, Nauka Publ., 1992. 250 p.
10. Goldshtik M. A. *Vikhrevyye potoki* [Vortex flows]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 366 p.

11. Sergeev S. P., Dil'man V. V., Genkin V. S. Description of flow in a channel with permeable walls. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 1971, vol. 5, no. 4, pp. 583–585 (In Russian).

12. Gel'perin N. I. *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii: v 2 knigakh* [The main processes and apparatuses of chemical technology: in 2 books]. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 812 p. (Series “Processes and Apparatuses of Chemical and Petrochemical Technology”.)

13. Idel'chik I. E. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistance]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1975. 560 p.

14. Shchukin V. K., Khalatov A. A. *Teploobmen, massoobmen i gidrodinamika zakruchennykh potokov v osesimmetrichnykh kanalakh* [Heat transfer, mass transfer and hydrodynamics of swirling flows in axisymmetric channels]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1982. 199 p.

15. Mednikov E. M. *Turbulentnyy perenos i osazhdeniye aerorozley* [Turbulent transport and deposition of aerosols]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 176 p.

16. Gorbis Z. R., Spokoynyy F. E. Qualitative analysis of the equations of averaged motion of solid particles in a turbulent flow. *Teoreticheskiye osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Technology], 1978, vol. 12, no. 5, pp. 729–734 (In Russian).

17. Sou S. *Gidrodinamika mnogofaznykh sistem* [Hydrodynamics of multiphase systems]. Moscow, Mir Publ., 1971. 536 p.

Информация об авторе

Волк Анатолий Матвеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: volk@belstu.by

Information about the author

Volk Anatoliy Matveevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Higher Mathematics. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volk@belstu.by

Поступила после доработки 16.03.2020