

Исследование свойств и законов распределения частиц сверхвысокомолекулярного полиэтилена

И.А. Беляков¹, И.С. Кленин¹, В. В. Топилин²

¹Волгоградский государственный технический университет

²Волгоградский филиал Института катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения
Российской академии наук

Аннотация: Производство сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) сопряжено со значительными пылевыведениями в производственное помещение, поэтому важную роль в технологическом процессе играет система аспирации. Исследование пыли в отходах производственного продукта, выделяющихся в рабочую зону, является одной из задач проводимых исследований. В данной работе приведены сведения о дисперсном составе частиц сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), на основе полученных данных построены различные графики. Экспериментальным путем получены данные о скорости осаждения частиц СВМПЭ. Проведен сравнительный анализ данных с теоретическими, полученными с помощью формул.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, СВМПЭ, дисперсный состав сверхвысокомолекулярного полиэтилена, скорость осаждения частиц сверхвысокомолекулярного полиэтилена, метод исследования свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

В последние годы наблюдается повышенный интерес к новым синтетическим полимерам, которые обладают рядом уникальных свойств. Этому в значительной степени способствует разработка и внедрение новейших каталитических систем, что, в свою очередь, позволяет получить целый ряд сверхвысокомолекулярных полимеров, обладающих свойствами, отсутствующими у более низкомолекулярных продуктов. Среди данных полимеров наибольший интерес вызывает СВМПЭ ввиду наличия целого комплекса ценных свойств [1-3].

К СВМПЭ относят полиэтилены, обладающие молекулярными массами более $1.5 \cdot 10^6$ [4]. Достоинства СВМПЭ заключаются в сочетании высокой износостойкости, устойчивости к агрессивным средам, низкого коэффициента трения, высокой ударной вязкости, низкой температуры хрупкости, что позволяет применять изделия на его основе в том числе в

экстремальных условиях эксплуатации [5]. Из СВМПЭ получают различные изделия: листы и пластины (направляющие и облицовка для бункеров, кузовов карьерных самосвалов; детали и элементы конструкций, подвергающиеся ударной нагрузке и истиранию в машиностроении, текстильной и целлюлозно-бумажной промышленности [6].

При производстве СВМПЭ происходят значительные пылевыведения в производственное помещение, что влияет на параметры микроклимата в рабочей зоне и делает процесс производства СВМПЭ невозможным, поэтому первоначальной задачей исследования СВМПЭ является определение геометрических параметров и характеристик частиц пыли. Определение данных параметров частиц пыли находит все большее применение в различных теоретических и практических исследованиях. Описание методик и исследований по определению дисперсионного состава пыли представлены в литературе [7-9]. Характер движения мелкодисперсных частиц для определения скорости осаждения указан в литературе [10,11].

Для исследования дисперсного состава СВМПЭ был получен образец с объекта производственного назначения по созданию СВМПЭ, на основе которого проводились лабораторные исследования. При исследовании были получены фотографии частиц пыли рис. 1.

Как видно из фотографий, полученных при исследовании под микроскопом, образцы СВМПЭ являются полидисперсной системой и имеют неправильную геометрическую форму. Исходя из этого, размеры частиц затруднительно определить путем измерений. Для совместимости характеристики размера и формы частиц в исследовании используется такое понятие, как эквивалентный диаметр.

По анализу лабораторных исследований дисперсного состава СВМПЭ для четырех образцов определены их размерные характеристики: площадь проекции частицы, эквивалентный диаметр, большая и меньшая из сторон

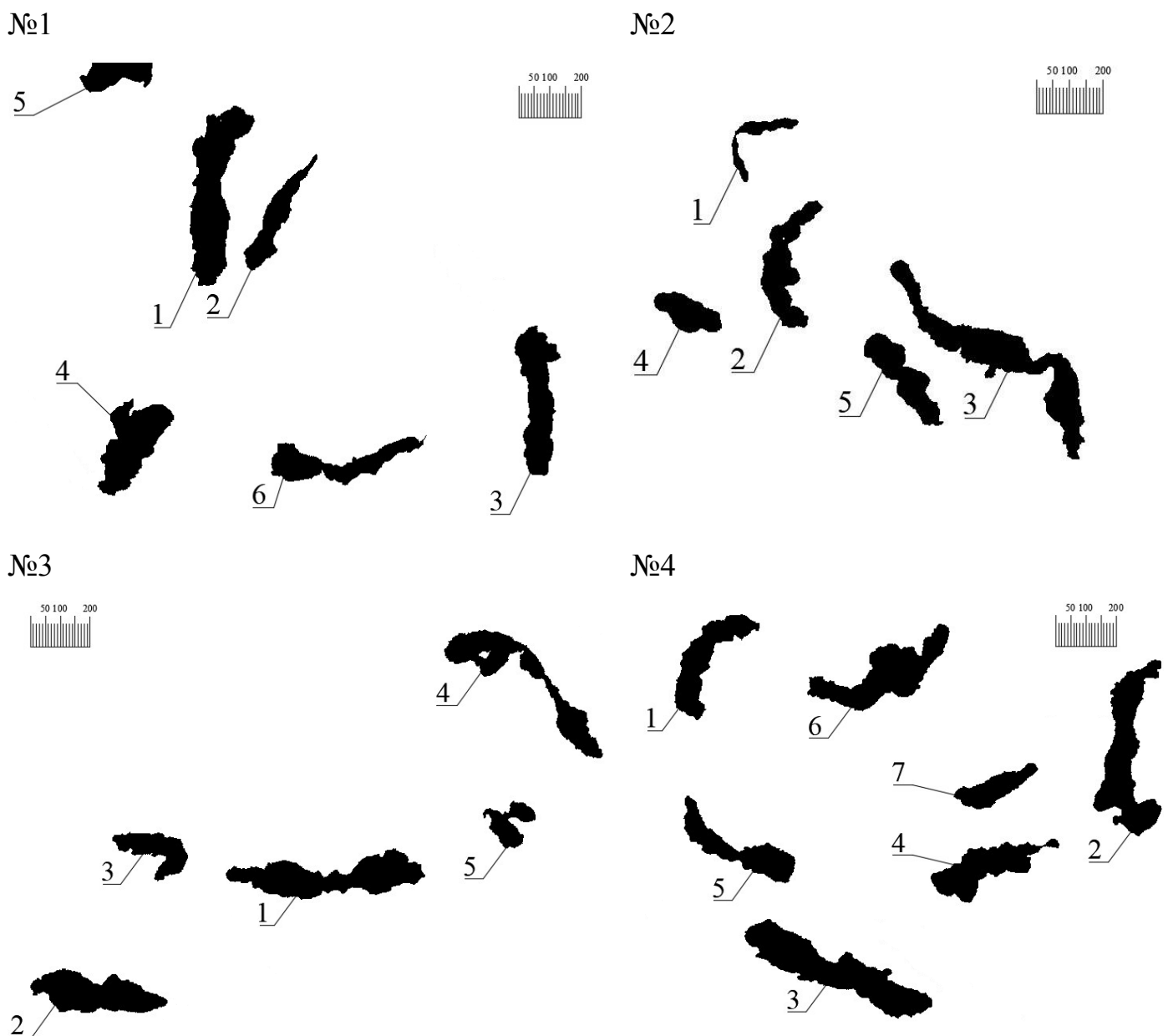


Рис. 1. – Исследуемые образцы пыли СВМПЭ: №1-№4 – порядковый номер исследуемого образца пыли СВМПЭ; 1-7 – проекции пылинок СВМПЭ частицы, периметр пятна, периметр эллипса. Данные, полученные в ходе исследования, указаны в таблице 1.

Рассмотрим эквивалентный диаметр частицы как одномерную случайную величину. Опишем свойства СВМПЭ функцией распределения D числа частиц по диаметрам частиц d_{ch} .

Таблица №1

Геометрические характеристики четырех образцов пыли

№ пят на	Площадь частицы пыли, мкм ²	Эквивалентный диаметр частиц пыли, мкм ²	Максимальная длина частицы, мкм	Минимальная длина частицы, мкм	Отношение минимальной к максимальной стороне частицы
Результаты первого образца					
1	22554,74	169,4	358,81	80,03	0,22
2	7897,83	100,2	259,10	38,81	0,14
3	23498,01	172,9	488,75	61,21	0,12
4	21053,99	163,7	306,12	87,56	0,28
5	1,03	1,1	1,43	0,91	0,63
6	11393,73	120,4	311,08	46,63	0,14
Результаты второго образца					
1	3147,34	63,3	148,83	26,92	0,18
2	11034,83	118,5	238,82	58,83	0,24
3	24103,07	175,1	494,96	62,00	0,12
4	5784,77	85,8	135,54	54,33	0,40
5	9219,65	108,3	207,74	56,50	0,27
Результаты третьего образца					
1	18079,37	151,7	395,00	58,27	0,14
2	5204,54	81,4	109,39	60,57	0,55
3	7678,56	98,8	161,35	60,59	0,37
4	21319,80	164,7	408,89	66,38	0,16
5	2,06	1,6	2,27	1,15	0,50
6	2,06	1,6	2,27	1,15	0,50
Результаты четвертого образца					
1	12677,28	127,0	240,25	67,18	0,27
2	18919,21	155,2	316,22	76,17	0,24
3	26347,48	183,1	359,95	93,19	0,25
4	6660,821	92,0	179,13	47,34	0,26
5	11813,65	122,6	272,55	55,18	0,20
6	13309,23	130,1	271,87	62,33	0,22
7	22,75436	5,3	7,40	3,91	0,52

Функция $D(d_{\text{ч}})$ равна выраженному в процентах отношению числа всех частиц СВМПЭ, диаметр которых меньше $d_{\text{ч}}$, к общему числу частиц материала, отсюда выполняется соотношение:

$$D(d_{\text{ч}_{\text{max}}}) = 100\%; D(d_{\text{ч}_{\text{min}}}) = 0\%;$$

где $d_{ch_{max}}$, $d_{ch_{min}}$ – наибольший и наименьший диаметры частиц, встречающиеся в исследуемом образце СВМПЭ.

На основании этого, с помощью вычислений, произведенных на компьютере, получим искомые величины (таблица 2).

Таблица №2

Распределение частиц пыли по диаметру

Эквивалентный диаметр частиц пыли, мкм ²	Кол-во, шт	Процент от всего числа частиц пыли, %	Процентное содержание фракции одного диаметра относительно общего числа частиц, %
Результаты первого образца			
1,1	1	16,6	0,000008
100,2	1	16,6	5,8
120,4	1	16,6	16,0
163,7	1	16,6	41,5
169,4	1	16,6	69,8
172,9	1	16,6	100
Результаты второго образца			
63,3	1	20	2,7
85,8	1	20	9,6
108,3	1	20	23,4
118,5	1	20	41,5
175,1	1	20	100
Результаты третьего образца			
1,6	2	33,3	0,00009
81,4	1	16,6	5,6
98,8	1	16,6	15,9
151,7	1	16,6	52,7
164,7	1	16,6	100
5,3	1	14,2	0,0009
Результаты четвертого образца			
92,1	1	14,2	4,6
122,6	1	14,2	15,6
127,0	1	14,2	27,8
130,1	1	14,2	41,0
155,2	1	14,2	63,3
183,1	1	14,2	100

На основании полученных данных построим графическую функцию распределения, изображающую кривые распределения (рис.2).

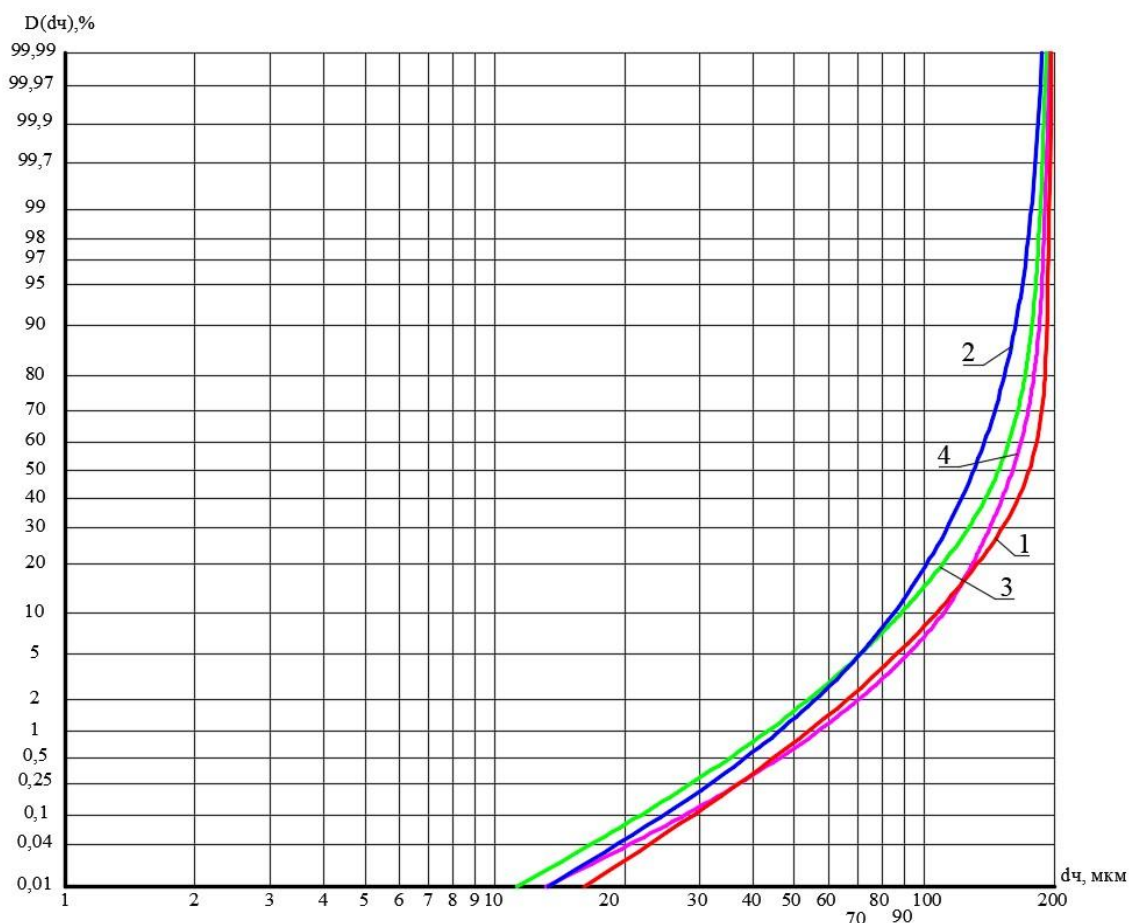


Рис. 2. – Кривые распределения частиц СВМПЭ: 1 – первый образец пыли; 2 – второй образец пыли; 3 – третий образец пыли; 4 – четвертый образец пыли

На данном графике по оси абсцисс откладываем размеры частиц, а по оси ординат – относительные содержания фракций, т.е. на графике показано процентное содержание каждой фракции, отнесенное к общему числу всего исследуемого материала.

Для последующих вычислений построим усредненный график исходя из результатов полученных образцов пыли СВМПЭ. График изображен на рис. 3.

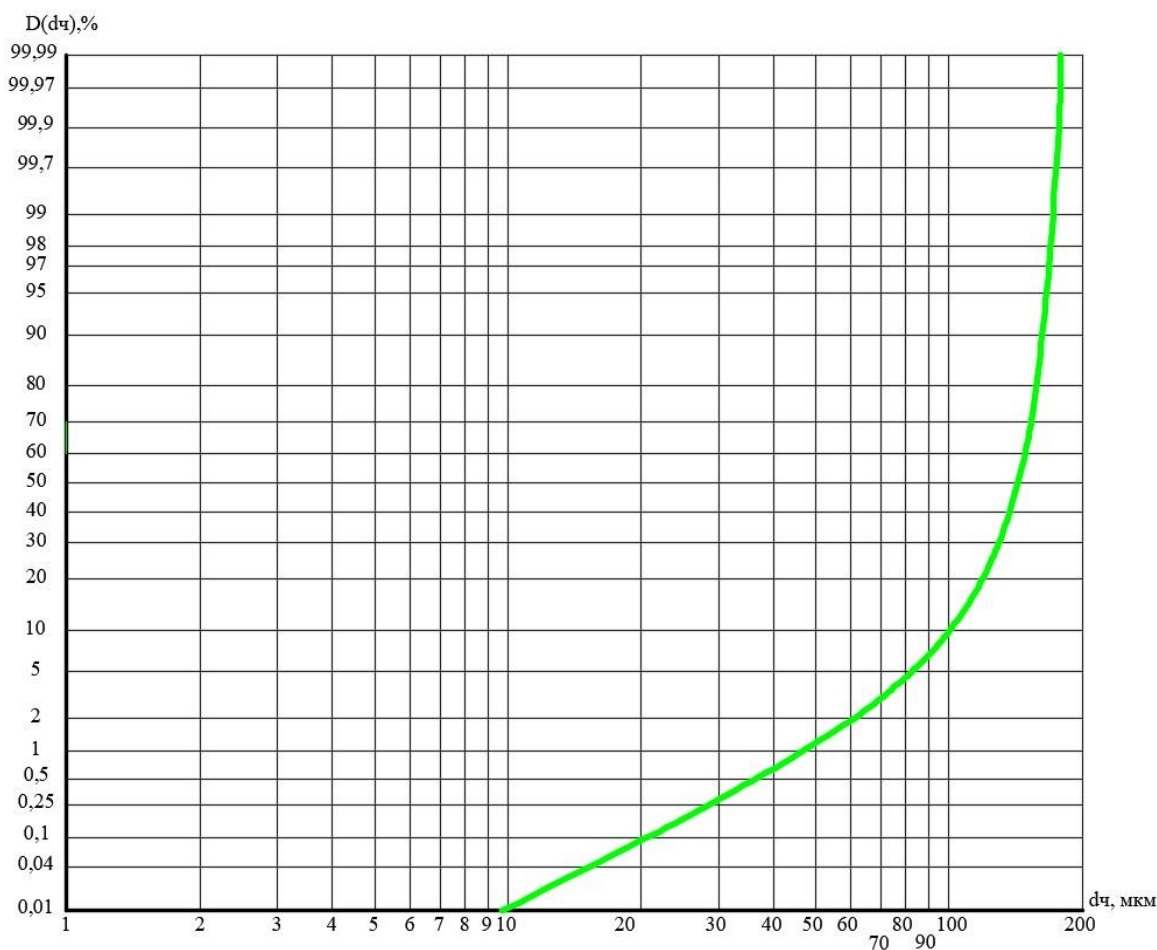


Рис. 3. – Усредненный интегральный график дисперсного состава пыли

С помощью натуральных исследований определим скорость осаждения частиц полиэтилена, которые проводились на установке, собранной самостоятельно. Установка представлена на рис. 4

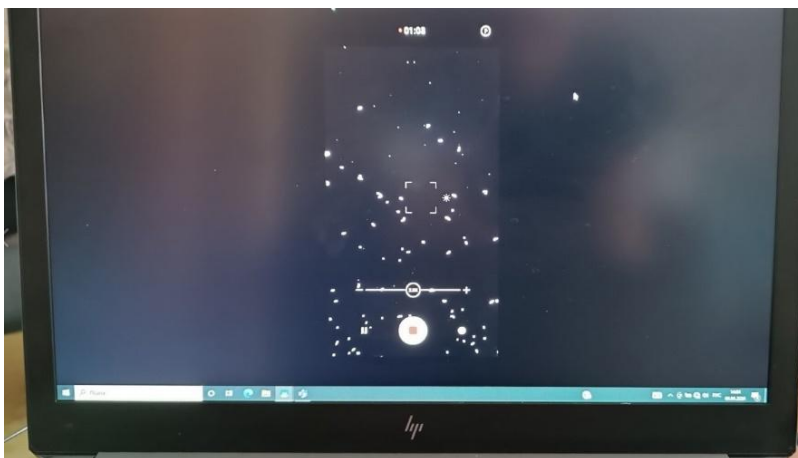
Каркасная установка состоит из трубы ПВХ (2), в которую сверху в отверстие сбрасывается материал при помощи поворотной заслонки (1). Сверху труба накрывается плотным материалом, для предотвращения попадания солнечного света. Полиэтилен осаждается на прозрачное стекло с подсветкой (3). Падение частиц фиксируется камерой, подключенной к компьютеру, которая находится в коробе, фото полученных частиц показано на рис. 5.

Видеоматериал разбивается покадрово, где время падения новой частицы на стекло фиксируется камерой.

а)



б)



в)



Рис. 4. – Экспериментальная установка и исследуемый материал:
а – установка для определения скорости осаждения частиц полиэтилена:
1 – сбросное отверстие с заслонкой; 2– труба для сброса материала;
3 - прозрачное стекло с подсветкой; 4 – каркас установки; б – фиксирование
падения частиц камерой, подключённой к компьютеру;
в – фото исследуемых частиц СВМПЭ

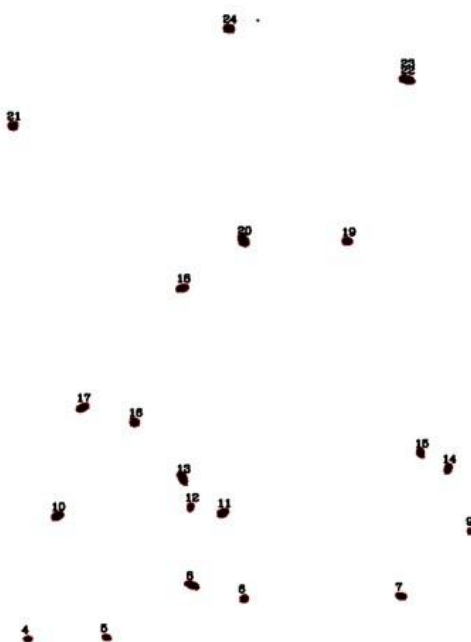


Рис. 5. – Результат обработки одного из кадров частиц СВМПЭ

Размер частиц на кадре имеет пиксельные размеры. С помощью референта размером 700 мкм (рис.6), пиксельные размеры были переведены в мкм.

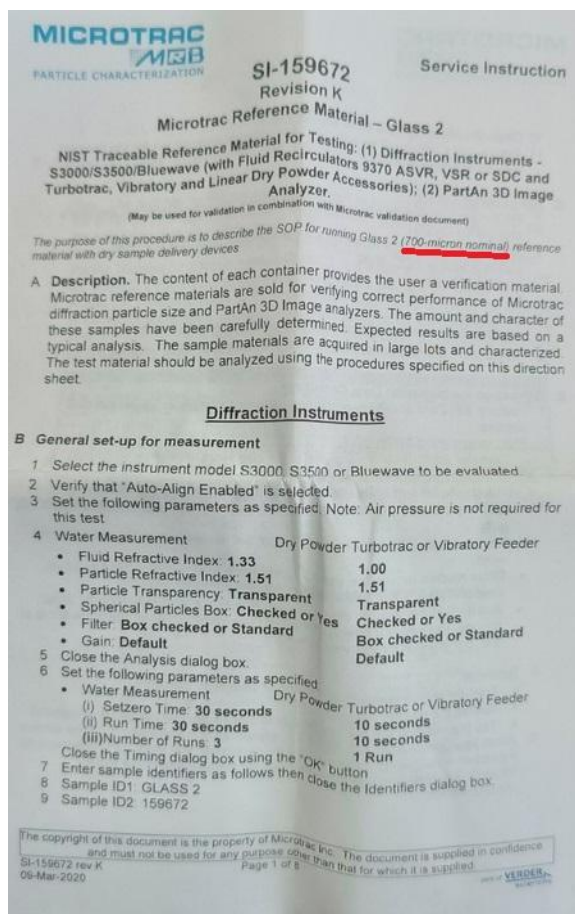
Размер референта составляет 2050 пикселей, эквивалентное значение в мкм составляет 700, отсюда следует $1 \text{ мкм} = 2,9286 \text{ пикселей}$. В таблице 3 укажем размер миделевого сечения исследуемых частиц с единицами измерения: пиксель; микрометры. По формуле (1) определим эквивалентный диаметр частицы:

$$d_3 = \sqrt{4 \cdot \frac{S}{\pi}} \quad (1)$$

где S – площадь миделевого сечения, мкм^2 ; π – математическая постоянная, число «пи».

Полученные по формуле данные запишем в третью графу таблицы 3, так же в четвертой графе укажем, полученные экспериментальным путем значения, скорости осаждения частиц СВМПЭ.

1)



2)

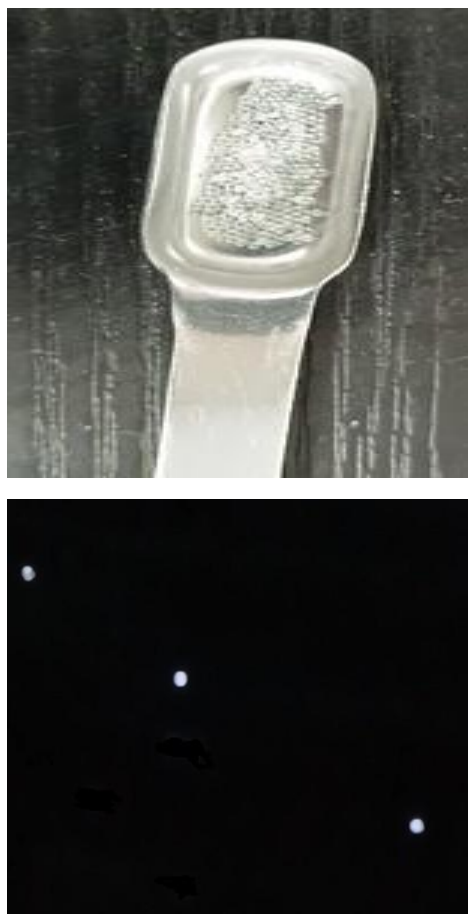


Рис. 6. – Используемый референт: 1 – фото документа, подтверждающего размер референта; 2 – фото референта

Полученные данные о скорости осаждения частиц полиэтилена сравним со скоростью осаждения этих же частиц, определяемой по закону Стокса, которую находим по формуле (2):

$$v_{oc} = \frac{d\chi^2 \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_0)}{18 \cdot \eta_0} \quad (2)$$

где $d\chi$ – диаметр частицы, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; ρ_1 – плотность материала, кг/м^3 ; ρ_0 – плотность среды, кг/м^3 ; η_0 – динамическая вязкость среды, $\text{Па} \cdot \text{с}$.

Результат зависимости скорости осаждения частиц полиэтилена от их размера, полученный путем исследований и по закону Стокса, сведен в таблицу 3.

Таблица №3

Зависимость скорости осаждения частиц полиэтилена от их размеров

Размер миделевого сечения			Скорость осаждения, м/с	Скорость осаждения по формуле Стокса, м/с.
Площадь частицы пыли, pixel	Площадь частицы пыли, мкм2	Эквивалентный диаметр частицы пыли, мкм2		
1847,87	630,97	28,35	0,30	0,022
1275,74	435,61	23,56	0,26	0,016
1184,30	404,39	22,70	0,25	0,014
802,64	274,07	18,69	0,25	0,010
630,75	215,38	16,56	0,23	0,008
835,95	285,44	19,07	0,22	0,010
1383,46	472,40	24,53	0,22	0,017
838,04	286,16	19,09	0,21	0,010
1014,16	346,30	21,00	0,20	0,012
795,20	271,53	18,60	0,20	0,010
723,40	247,01	17,74	0,20	0,009
771,02	263,27	18,31	0,19	0,009
591,22	201,88	16,04	0,19	0,007
924,02	315,52	20,05	0,19	0,011
808,67	276,13	18,76	0,19	0,010
698,88	238,64	17,44	0,18	0,009
668,52	228,27	17,05	0,18	0,008
726,32	248,01	17,77	0,17	0,009
895,60	305,81	19,74	0,17	0,011
536,12	183,06	15,27	0,17	0,007
449,30	153,42	13,98	0,15	0,005
834,40	284,91	19,05	0,15	0,010
476,82	162,81	14,40	0,15	0,006
612,33	209,09	16,32	0,15	0,007
462,33	157,87	14,18	0,14	0,006
652,84	222,92	16,85	0,14	0,008
818,46	279,47	18,87	0,13	0,010
604,50	206,41	16,22	0,13	0,007
600,76	205,14	16,17	0,13	0,007
591,55	201,99	16,04	0,13	0,007
712,83	243,40	17,61	0,13	0,009
629,16	214,83	16,54	0,12	0,008
327,87	111,95	11,94	0,12	0,004
423,08	144,46	13,57	0,11	0,005
405,75	138,55	13,29	0,11	0,005

По результатам таблицы 3 был построен график двух полученных скоростей зависящий от размера частиц, изображенный на рис. 7

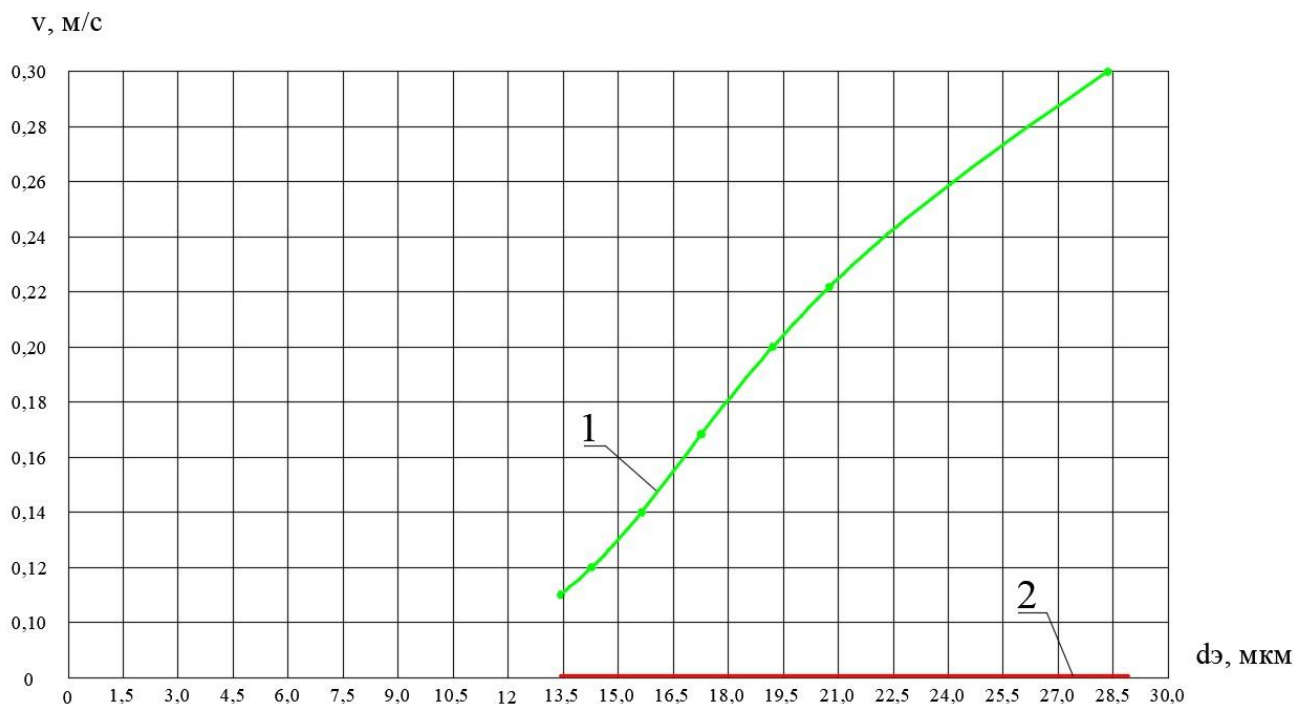


Рис. 7. – График зависимости скорости осаждения частиц от их размера:

1 – кривая скорости осаждения, построенная по результатам натурных исследований; 2 – кривая скорости осаждения, определенная с помощью закона Стокса

Для более удобной наглядности полученных результатов построим график, исходя из логарифмических значений скоростей и эквивалентных диаметров, тогда формула Стокса примет вид (3):

$$\log_{10} v_{oc} = \log_{10} v_{oc} + \log_{10} g + \log_{10}(\rho_1 - \rho_0) - \log_{10} g \quad (3)$$

где v_{oc} – скорость осаждения м/с, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_1 – плотность материала, кг/м³; ρ_0 – плотность среды, кг/м³.

Результаты расчета сведены в таблицу 4. По результатам таблицы 4 построим график рис. 8

Таблица №4

Логарифмические значения скоростей и эквивалентных диаметров

Натуральный логарифм эквивалентного диаметра частиц СВМПЭ	Натуральный логарифм скорости осаждения, полученной экспериментальным путем	Натуральный логарифм скорости осаждения по закону Стокса
1,453	-0,52	-1,66
1,372	-0,59	-1,80
1,356	-0,60	-1,85
1,272	-0,60	-2,00
1,219	-0,64	-2,10
1,280	-0,66	-2,00
1,390	-0,66	-1,77
1,281	-0,68	-2,00
1,322	-0,70	-1,92
1,270	-0,70	-2,00
1,249	-0,70	-2,05
1,263	-0,72	-2,05
1,205	-0,72	-2,15
1,302	-0,72	-1,96
1,273	-0,72	-2,00
1,242	-0,74	-2,05
1,232	-0,74	-2,10
1,250	-0,77	-2,05
1,295	-0,77	-1,96
1,184	-0,77	-2,15
1,146	-0,82	-2,30
1,280	-0,82	-2,00
1,158	-0,82	-2,22
1,213	-0,82	-2,15
1,152	-0,85	-2,22
1,227	-0,85	-2,10
1,276	-0,89	-2,00
1,210	-0,89	-2,15
1,209	-0,89	-2,15
1,205	-0,89	-2,15
1,246	-0,89	-2,05
1,219	-0,92	-2,10
1,077	-0,92	-2,40
1,133	-0,96	-2,30
1,124	-0,96	-2,30

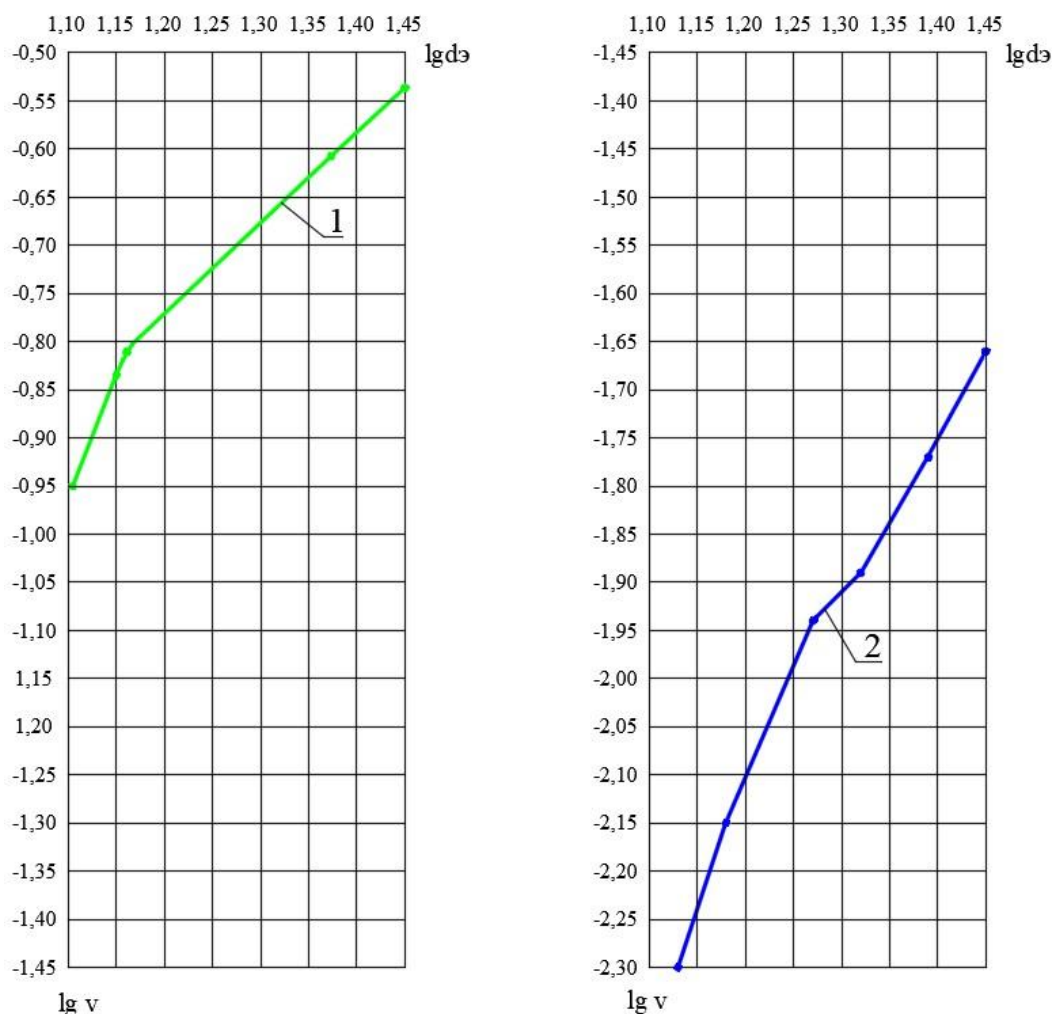


Рис. 8. График зависимости скорости осаждения частиц от их размера выраженная через логарифмическую функцию: 1 – логарифмическая кривая скорости осаждения, построенная по результатам натурных исследований; 2 – логарифмическая кривая скорости осаждения, определенная с помощью закона Стокса.

Как видно из графика (рис. 8), логарифмическая кривая, определенная с помощью закона Стокса и логарифмическая кривая, построенная по результатам натурных исследований, имеют практический одинаковый угол наклона, но разное положение на координатной плоскости.

Полученные результаты скорости осаждения частиц разными способами могут говорить о том, что плотность материала, взятая из справочных данных, может отличаться от реальной, что влияет на

теоретический метод определения скорости осаждения частиц. Выяснив действительную плотность частиц СВМПЭ, можно будет утверждать о применимости закона Стокса к данному материалу.

Выводы

1. Для отобранных частиц СВМПЭ был построен график функции распределения числа частиц по их эквивалентному диаметру.
2. Натурными исследованиями и формульными расчетами была получена скорость осаждения частиц СВМПЭ.
3. Полученные данные позволили сформулировать требования к дальнейшей доработке проводимого исследования.

Литература

1. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен // Полимерные материалы. 2003. № 3. С. 18-21.
2. Stein H.L. Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) // Engineered Materials Handbook. ASM Int. 1999. - pp. 167-171.
3. Prout E.O. UHMW polyethylene // Modern Plastics encyclopedia. 1986-1987. pp. 67-68.
4. Матвеева Н.В., Мусин Р.Р. 3D-проектирование установки производства сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Вестник Казанского технологического университета, 2013, №10. С. 146-147.
5. Валуев М.И., Колобков А.С., Малаховский С.С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // Труды ВИАМ, 2020, №3(87). С. 49-57.
6. Галибеев С.С., Хайруллин Р.З., Архиреев В. П. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Тенденции и перспективы // Вестник Казанского технологического университета, 2008, №2. С. 50-55.
7. Азаров В.Н., Ребров В.А., Козловцева Е.Ю., Азаров А.В., Добринский Д.Р., Тertiшников И.В., Поляков И.В., Абухба Б.А. О совершенствовании

- алгоритма компьютерной программы анализа дисперсного состава пыли в воздушной среде // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y20185/4976/.
8. Азаров В.Н., Сергина Н.М. Методика микроскопического анализа дисперсного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК): Волгогр. гос. арх-стронт. акад. Волгоград, 2002 Деп. в ВИНТИ 15.07.2002 №1332-80002. 7 с.
9. Азаров В.Н., Барикаева Н.С., Николенко Д.А., Соловьева Т.В. Об исследовании загрязнения воздушной среды мелкодисперсной пылью с использованием аппарата случайных функций // Инженерный вестник Дона, 2015, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3350/.
10. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
11. Азаров В.Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий: автореф. дис. - д-р техн. наук: 05.26.01. Ростов-на-Дону, 2004, С. 48.

References

1. Mihajlin Ju.A. Sverhvyssokomolekuljarnyj polijetilen. Polimernye materialy. 2003. № 3. pp. 18-21.
2. Stein H.L. Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE). Engineered Materials Handbook. ASM Int. 1999. pp. 167-171.
3. Prout E.O. UHMW polyethylene. Modern Plastics encyclopedia. 1986-1987. pp. 67-68.
4. Matveeva N.V., Musin R.R. Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta, 2013, №10. pp. 146-147.
5. Valuev M.I., Kolobkov A.S., Malaxovskij S.S. Trudy VIAM, 2020, №3 (87). pp. 49-57.

6. Galibeev S.S., Hajrullin R. Z., Arhireev V. P. Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta, 2008, №2. pp. 50-55.
7. Azarov V.N., Rebrov V.A., Kozlovceva E.Yu., Azarov A.V., Dobrinskij D.R., Tertishnikov I.V., Polyakov I.V., Abuxba B.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y20185/4976/.
8. Azarov V.N., Sergina N.M. Metodika mikroskopicheskogo analiza dispersnogo sostava pyli s primeneniem personal'nogo komp'yutera (PK) [Methodology of microscopic analysis of dust dispersion composition using a personal computer (PC)]: Volgogr. gos. arh-stront. akad. Volgograd, 2002 Dep. v VINITI 15.07.2002 №1332-80002. 7 p.
9. Azarov V.N., Barikaeva N.S., Nikolenko D.A., Solov"eva T.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2015/3350/.
10. Fuks N.A. Mehanika ajerozolej [Aerosol mechanics]. M: Izd-vo AN SSSR, 1955. 352 p.
11. Azarov V.N. Kompleksnaja ocenka pylevoj obstanovki i razrabotka mer po snizheniju zapylenosti vozduшной среды promyshlennyh predpriyatij [Comprehensive assessment of dust conditions and development of measures to reduce dustiness of the air environment of industrial enterprises]: avtoref. dis. d-r tehn. nauk: 05.26.01. Rostov-na-Donu, 2004, pp. 48.

Дата поступления: 14.07.2024

Дата публикации: 25.08.2024