

UDC 69.001.5

**Author: GRYAZNOV Igor Vasilevich**, Engineer, Director of the STE Ltd. TARK; Novya, 3a, 43, Pavlograd, Dnipropetrovsk region, Ukraine, 51413, e-mail: lustann@mail.ru;

**Author: FIGOVSKY Oleg Lvovich**, Full Member of European Academy of Sciences, Foreign Member of REA and RAASN, Editor-in-Chief of Journals SITA (Israel), OCJ and ICMS (USA), Director R&D of INRC Polymate (Israel) and Nanotech Industries, Inc. (USA); Chairman of the UNESCO chair «Green Chemistry»; President of Israel Association of Inventors; Laureate of the Golden Angel Prize, Polymate INRC; P.O.Box 73, Migdal Ha'Emeq, Israel, 10550, e-mail: figovsky@gmail.com

## THE NEW TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING POLYMER NANOPOWDER. PART II.

### EXTENDED ABSTRACT:

The authors studied the problem of pollution by waste polymers. The research is dedicated to the methods of recycling of polymers, in particular PTFE. It was shown that the most environmentally friendly disposal methods with the lowest cost are the methods based on stepwise mechanical dispersion. Technologies and devices based on the principles of abrasive vortex dispersion polymers have been developed and tested. To protect the intellectual property of the author the staff of LLC TARK (Ukraine) and the Science and Technology Center Polymate (Israel) registered patent USA «Method and apparatus for manufacturing submicron polymer powder» No. 12 / 981.202 of 29.12.2010.

**Key words:** polymers, waste, polytetrafluoroethylene, recycling, environmental friendliness, abrasive grinding, aerodynamic dispersion, rotary-vortex machine.

DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2015-7-6-28-57

### MACHINE-READABLE INFORMATION ON CC-LICENSES (HTML-CODE) IN METADATA OF THE PAPER

```
<a rel=»license» href=»http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/»><img alt=»Лицензия Creative Commons»
style=»border-width:0» src=»https://i.creativecommons.org/1/by/4.0/88x31.png» /></a><br />Произведение «<span
xmlns:dct=»http://purl.org/dc/terms/» href=»http://purl.org/dc/dcmitype/Text» property=»dct:title» rel=»dct:type»>The
new technology for manufacturing polymer</span>» созданное автором по имени «<a xmlns:cc=»http://creativecommons.org/
ns#» href=»Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction.» property=»cc:attributionName» rel=»cc:attr
ibutionURL»>Gryaznov I.V., Figovsky O.L.</a>, публикуется на условиях «<a rel=»license» href=»http://creativecommons.
org/licenses/by/4.0/»>лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная</a>.<br />Основано
на произведении с «<a xmlns:dct=»http://purl.org/dc/terms/» href=» http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2015/»
rel=»dct:source»> http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2015/</a>.<br />Разрешения, выходящие за рамки данной
лицензии, могут быть доступны на странице «<a xmlns:cc=»http://creativecommons.org/ns#» href=»figovsky@gmail.com»
rel=»cc:morePermissions»>figovsky@gmail.com</a>».
```



*The Part I of the paper of Gryaznov I.V. and Figovsky O.L. «The New Technology for Manufacturing Polymer Nanopowder» is published in the issue 5/2015 of the journal «Nanotechnologies in Construction».*

### References:

1. Europe in figures. Eurostat Annual. 2006–2007. 371 p.
2. *Suprunenko O.* Musornaja jera ot rassveta do zakata. [Garbage era from dawn to sunset]. *Jekologija i Obshestvo [Ecology and Society]*. 2006. № 4. (In Russian).
3. The island of trash in the Pacific Ocean has already exceeded twice the territory of the United States. Information Digest «noospherogenesis» (On the way to sustainable development of mankind) № 3, 2008. Category: Environment.
4. *Chegodaev D.D., Naumov Z.K., Dunaevskaya Y.S.* Ftoroplasty [Fluorines]. Leningrad. Goskhimizdat. 1971. 192 p. (In Russian).
5. *Bouznik V.M.* Ftoropolimery: sostojanie otechestvennoj himii ftoropolimerov, perspektivy razvitija [Fluoropolymers: state of domestic fluoropolymers chemistry, development prospects]. *Russian Chemical Journal (magazine Rus. Chem. of the Society named after D.I. Society Mendeleev)*. 2008. V. LII, № 3. (In Russian).
6. *Borschev V.J.* Oborudovanie dlja pererabotki sypuchih materialov [Equipment for processing of bulk materials]. Tutorial. Moscow. Mashinostroenie-1. 2006. 208 p. (In Russian).
7. *Pugachev A.K., Roslyakov O.A.* Pererabotka ftoroplastov v izdelija: Tehnologija i oborudovanie [Processing of fluoropolymers in the product: technology and equipment] Saint-Petersburg. Himija [Chemistry], 1987. 168 p. (In Russian).
8. *Gorbatsevich G.N.* et al. Materialy na osnove modifitsirovannogo politetraftorjetilena [Materials based on modified PTFE]. *Materialy, oborudovanie i resursosberegajushhie tehnologii: materialy mezhdunar. nauch.-tehn. konf. [Materials, equipment and resource-saving technologies: Proceedings of the International Scientific and Engineering Conference]* Mogilev. Bel. Ros. University Press, 2008. Part 2. P. 29–30. (In Russian).
9. *Villemson A.L.* Sovremennoe sostojanie i perspektivy mirovogo rynka ftoropolimerov [Current state and prospects of the world market of fluoropolymers]. *Mezhdunarodnye novosti mira plastmass [International news in the world of plastics]*. 2008. № 11–12. P. 20–23. (In Russian).
10. *Struck V.A.* et al. Optimizacionnaja tehnologija funkcional'nyh kompozitsionnyh materialov na osnove politetraftorjetilena [Optimization technology of functional composite materials based on PTFE]. *Promyshlennost' regiona: problemy i perspektivy innovacionnogo razvitija [Regional Industry: Problems and perspectives of innovation development]*. Monograph. Grodno GGAU, 2008. P. 302–315. (In Russian).



11. *Gorbatsevich G.N.* et al. Germetizirujushhie kompozity na osnove politetraftorjetilena s povyshennoj iznosostojkost'ju [Sealants composites based on PTFE with improved wear resistance]. *Kompozicionnye materialy v promyshlennosti: materialy XXVIII mezhdunar.konf [Composite Materials Industry: Proc. of the XXVIII international. conf.]*. Kiev. UIC «Nauka. Tehnika. Tehnologija» [Educational and publishing center «Science. Equipment. Technology»]. 2008. P. 64–70. (In Russian).
12. *Struck V.A.* et al. Metodologija formirovanija funkcional'nyh nanomaterialov na osnove politetraftorjetilena [Methodology of formation of functional nanomaterials based on PTFE]. *Effektivnost' realizacii nauchnogo, resursnogo i promyshlennogo potentsiala v sovremennyh uslovijah: materialy VIII mezhdunar. promysl. konf. [Efficiency of research, resource and industrial potential in modern conditions: materials of the VIII Intern. indus. Conf.]*. Kiev. UIC «Science. Equipment. Technology» [Educational and publishing center «Science. Equipment. Technology»]. 2008. P. 48–54. (In Russian).
13. *Kuryavy V.G., Tsvetnikov A.K., Gorbunov A.V.* Morfologicheskoe stroenie produktov piroliza ul'tradispersnogo politetraftorjetilena [The morphological structure of the pyrolysis products of ultrafine PTFE]. *Perspektivnye materialy [Perspective materials]* 2002. № 6. P. 72–74. (In Russian).
14. *Bouznik V.M., Tsvetnikov A.K.* Ul'tradispersnyj politetraftorjetilen kak osnova dlja novyh perspektivnyh materialov [Ultrafine PTFE as a base for new promising materials]. *Vestnik DVO RAN [Bulletin FEB RAS]*. 1993. № 3. P. 39. (In Russian).
15. *Sedlis L.V.* Telomery tetraftorjetilena. [Telomeres tetrafluoroethylene]. Moscow: NIITEKHIM. 1974. 45 p. (In Russian).
16. *Charlesby A.* The Decomposition of Polytetrafluoroethylene by Pile Radiation / Charlesby. Great Britain Atomic Energy Reserch Establishment AERE M / R. 1952. 296 p.
17. *Currie J. A., Pathmanand N.* *Anal. Calorim.*, 3 (1974) 629.
18. *Popova G.S., Budtov V.P., Ryabikova V.M.* et al. Analiz polimerizacionnyh plastmass [Analysis of polymer plastics]. Leningrad. Himija [Chemistry], 1988. (In Russian).
19. *Korbakova A.I., Makulova I.D., Marchenko E.N.* et al. Toksikologija ftororganicheskikh soedinenij i gigiena truda v ih proizvodstve [Toxicology organofluorine compounds and occupational hygiene for the production of them]. Moscow. Medicina [Medicine], 1975.
20. *Blagodarnaia O.A.* Gigiena truda v sovremennyh proizvodstvah po pererabotke ftoroplasta-4 [Occupational health in modern production processing fluoroplastic-4]. *Gigiena truda v himicheskoj i himiko-farmaceuticheskoj promyshlennosti [Occupational hygiene in the chemical and pharmaceutical industries]*. NF Izmerova. Moscow. 1976. p. 115–123. (In Russian).



21. *Shadrina N.E., Kleshcheva M.S., Loginova N.N.* et al. Analiz karbocepnyh ftoropolimerov metodom piroliticheskoj gazovoj hromatografii [Analysis of the carbon-chain fluoropolymers by pyrolysis gas chromatography]. Zhurnal analiticheskoj himii [Journal of Analytical Chemistry]. 36, 6 (1981) 1125.
22. *Morisaki S.* Thermochim. acta. 25, 2 (1978) 171.
23. *Madorskiy C.* Termicheskoe razlozhenie organicheskikh polimerov [The thermal decomposition of organic polymers]. Moscow. Mir. 1967. P. 328.
24. *Degteva T.G., Sedov I.M., Khamidov J.A., Kuz'minskii A.S.* Okislenie ftorsoderzhashhih polimerov [Oxidation of fluoropolymers]. Dep. Uzb. Chemical Journal. Tashkent, 1971. № 3699.
25. Ftropolimery / ed. L.A. Walla. Moscow. Mir. 1975. 448 p.
26. *Mashkov J.K.* Tribofizika i svojstva napolnennogo ftoroplasta [Tribophysics and properties of filled fluoroplastic] Omsk. Publishing House of the Omsk State Technical University, 1997. 250 p. RU 2528054.
27. *Uminsky A.A., Tsvetnikov A.K., Ippolitov E.G., Pogodaev V.P., Kedrinskii I.A., Sobolev G.L., Borovnev L.M.* Sposob poluchenija poliftorugleroda [A method for preparing polyfluorocarbon] Patent. A s. 1662100 RF MKI 5 C08G 113/18.
28. *Tsvetnikov A.K., Uminsky A.A., Tsarev V.A.* Ustanovka dlja pererabotki politetraftorjetilena [Plant for the reprocessing of polytetrafluoroethylene]. Patent. 1763210 RF MKI V29V 17/00 /. 4 p.
29. *Tsvetnikov A.K.* Plant for the reprocessing of polytetrafluoroethylene: Patent. 2035308 RF MKI V29V 17/00 /. 4c., Il. P. 1763210 RF MKI V29V 17/00.
30. *Bouznik V.M., Tsvetnikov A.K., Matveenko L.A.* Dispergirovanie politetraftorjetilena dlja racional'nogo ispol'zovaniya materiala [The dispersion of PTFE for the rational use of material]. Himija v interesah ustojchivogo razvitija [Chemistry for sustainable development]. 1996. № 4. P. 489.
31. *Tsvetnikov A.K., Bouznik V.M., Matvienko L.A.* Sposob poluchenija tonkodispersnogo PTFJe i soderzhashhaja ego masljanaja kompozicija [A method for producing fine particle PTFE and oil composition containing it] Patent. 2100376 RF MKI 6 C08F 114/26, C08J 11/04, 11/10.
32. *Filatov V.Y., Fuchs S.L., Sukhanov E.N., Kazienkov S.A., Hitrin S.V.* Sposob pererabotki ftoroplastov i materialov, ih soderzhashhih, s polucheniem ul'tradispersnogo ftoroplasta i perftorparafinov [Method for processing fluoropolymers, and materials containing them to produce ultrafine fluoroplastic and perftorparafinov]. RU 2528054. Vyatka State University (RU).
33. *Arsenyev S.L., Lozovitsky I.B., Sirik Y.P., Turaev V.V., Odnoral M.V., Danilov E.A.* Tehnicheskoe predlozhenie: Tehnologija i oborudovanie dispergirovaniya vtorichnogo politetraftorjetilena [Technical Proposal: The technology and equipment of the secondary dispersion of polytetrafluoroethylene]. Pavlograd, 2004. UDC 678.743.41 / 45: 678.06 621,921: 620.178.16.



34. *Dubinskaya A.M.* Prevrashheniya organicheskikh veshhestv pod dejstviem mehanicheskikh naprjazhenij [The transformations of organic substances under the influence of mechanical stresses]. *Uspehi himii [Russian Chemical Reviews]*. 1999. 68 (8). P. 708–724.
35. *Azgaldov G.G., Reichman E.P.* O kvalimetrii [About qualimetry]. Moscow. Ed. Standards, 1973. 220 p.
36. *Alekseev V.P., Azarov A.I., Drozdov A.F., Krotov P.E.* Novaja vihrevaja tehnika dlja sredstv ohrany truda [New Whirlpool appliances for labor protection funds]. *Vihrevoj jeffekt i ego primenenie v tehnike: Materialy 4-j Vsesojuznoj nauchno-tehnicheskoi konferencii [Vortex effect and its applications in engineering: Proceedings of the 4th All-Union Scientific and Technical Conference]*. Kuybyshev. Kuai. 1984. P.104–111.
37. *Babakin B.S., Vygodin V.A.* Bytovye holodil'niki i morozil'niki: Spravochnik [Household refrigerators and freezers: A Handbook]. Moscow. Kolos. 2000. P. 455–456.
38. *Biryuk V.V.* Vihrevoj jeffekt jenergeticheskogo razdelenija gazov v aviacionnoj tehnike i tehnologii [Vortex effect of energy separation of gases in aeronautical engineering and technology]. *Izvestia Vuzov. Aviacionnaja tehnika [Aviation equipment]*. 1993, № 2, p. 20–23.
39. *Kiryuhin D.P., Kim I.P., Bouzник V.M., Ignatieff L.N., Kuryavii V.G., Sakharov S.G.* Radiacionno-himicheskij sintez telomerov tetraftorjetilena i ih ispol'zovanie dlja sozdaniya tonkih zashhitnyh ftorpolimernyh pokrytij [Radiation-chemical synthesis of telomeres of tetrafluoroethylene and use them to create a thin protective coating fluoropolymer]. *Russian Chemical Journal (magazine Rus. Chem. of the Society named after D.I. Society Mendeleev)*. 2008, V. LII, № 3.
40. *Gryaznov I., Gryaznov S., Gryaznova A., Figovsky O.* Method and apparatus for manufacturing submicron polymer powder. Patent No. 12/981.202 of 29.12.2010.

**DEAR COLLEAGUES!**

**THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:**

*Gryaznov I.V., Figovsky O.L.* The new technology for manufacturing polymer nanopowder. Part II. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2015, Vol. 7, no. 6, pp. 28–57. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2015-7-6-28-57](http://dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2015-7-6-28-57).

**Contact information**

**Figovsky Oleg Lvovich**  
**[figovsky@gmail.com](mailto:figovsky@gmail.com)**



УДК 69.001.5

**Автор: ГРЯЗНОВ Игорь Васильевич**, инженер, директор НТП ООО ТАРК; ул. Новая, За, 43, г. Павлоград, Днепропетровская обл., Украина, 51413, e-mail: lustann@mail.ru;

**Автор: ФИГОВСКИЙ Олег Львович**, действительный член Европейской академии наук, иностранный член РИА и РААСН, главный редактор журналов SITA, OSJ и RPCS, директор компании «Nanotech Industries, Inc.», Калифорния, США, директор Международного нанотехнологического исследовательского центра «Polymate» (Израиль), зав. кафедрой ЮНЕСКО «Зелёная химия», президент Израильской Ассоциации Изобретателей, Лауреат Golden Angel Prize, Polymate INRC; P.O.Box 73, Migdal Ha'Emeq, Израиль, 23100, e-mail: figovsky@gmail.com

## НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОПОРОШКОВ. ЧАСТЬ II.

### АННОТАЦИЯ К СТАТЬЕ (АВТОРСКОЕ РЕЗЮМЕ, РЕФЕРАТ):

Изучена проблема загрязнения окружающей среды отходами полимеров. Исследованы методы утилизации полимеров, в частности, ПТФЭ. Отмечено, наиболее экологически чистыми и минимально затратными методами утилизации являются методы, основанные на постадийном механическом диспергировании. Разработаны и экспериментально апробированы технология и устройство, основанные на принципах абразивно-вихревого диспергирования полимеров. С целью защиты интеллектуальной собственности авторами – сотрудниками предприятия ООО ТАРК (Украина) и научно-технического центра Polymate (Израиль) был зарегистрирован патент США «Method and apparatus for manufacturing submicron polymer powder» // Патент 12/981,202 от 29.12.2010.

**Ключевые слова:** полимеры, отходы, политетрафторэтилен, утилизация, экологическая чистота, абразивное измельчение, аэродинамическое диспергирование, роторно-вихревой агрегат.

DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2015-7-6-28-57

### МАШИНОЧИТАЕМАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СС-ЛИЦЕНЗИИ В МЕТАДАННЫХ СТАТЬИ (HTML-КОД):

```
<a rel=»license» href=»http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/»>><img alt=»Лицензия Creative Commons» style=»border-width:0» src=»https://i.creativecommons.org/l/by/4.0/88x31.png» /></a><br />Произведение «<span xmlns:dct=»http://purl.org/dc/terms/» href=»http://purl.org/dc/dcmitype/Text» property=»dct:title» rel=»dct:type»>Новая технология изготовления полимерных</span>> созданное автором по имени <a xmlns:cc=»http://creativecommons.org/ns#» href=»Нанотехнологии в строительстве. – 2015. – Том 7,» property=»cc:attributionName» rel=»cc:attributionURL»>The new technology Грязнов И.В., Фиговский О.Л.</a>, публикуется на условиях <a rel=»license» href=»http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/»>>лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная</a>.<br />Основано на произведении с <a xmlns:dct=»http://purl.org/dc/terms/» href=»http://nanobuild.ru/ru_RU/nanobuild-6-2015/» rel=»dct:source»>http://nanobuild.ru/ru_RU/nanobuild-6-2015/</a>.<br />Разрешения, выходящие за рамки данной лицензии, могут быть доступны на странице <a xmlns:cc=»http://creativecommons.org/ns#» href=»figovsky@gmail.com» rel=»cc:morePermissions»>figovsky@gmail.com</a>.
```



Часть I статьи Грязнова И.В., Фиговского О.Л. «Новая технология изготовления полимерных нанопорошков» опубликована в номере 5/2015 журнала «Нанотехнологии в строительстве».

## Прототипы

Принципиальная схема проектируемого агрегата заимствована из литературы по технологии приготовления сыпучих дисперсных смесей для композиционных материалов [7]. Такой вид диспергирования не связан с процессами химического разложения измельчаемого материала, исключает его потери и вредное воздействие на окружающую среду.

Из всех существующих видов диспергационных механизмов наиболее приемлемым для реализации разработанного способа является роторно-вихревой (роторно-пульсационный) агрегат (РВА). РВА предназначены для тонкого и сверхтонкого измельчения, смешивания и механохимической активации твёрдых материалов, а при соответствующей доработке могут применяться для решения и других технологических задач. Принцип работы РВА построен на аэромеханическом измельчении частиц, движущихся с высокой скоростью (выше 200 м/сек) при высокоскоростном вращении ротора, генерирующего вихревые потоки в объёме РВА. Частицы измельчаются в результате воздействия разрывных сил, возникающих при вихревом движении газовой среды и вращения частиц вокруг своей оси, взаимного столкновения частиц в вихревом потоке, а также столкновения с вращающимся с высокой скоростью ротором и неподвижными элементами РВА (прочность частицы на разрыв на порядок меньше, чем на удар-сжатие). По интенсивности подачи энергии к материалу РВА является непревзойдённым лидером. Высокая эффективность измельчения материалов в РВА наиболее показательна в случае измельчения хрупких или волокнистых материалов.

При проектировании РВА применялись технические решения, позволяющие:

- обеспечить максимальную подачу механической энергии в возможно наименьший объём, то есть интенсифицировать поступление энергии к материалу;
- организовывать потоки частиц в объёме агрегата таким образом, чтобы обеспечивалась передача энергии от рабочего органа к измельчаемому продукту, а полученные частицы вращались в цен-



тробежном поле и распределялись по радиусу вращения пропорционально массе;

- отводить тепло от материала путем охлаждения газопылевой смеси в объеме агрегата.

В разрабатываемой технологии процесс диспергирования блочного ПТФЭ осуществляют в две стадии. В первой стадии массив блочного ПТФЭ перерабатывают в волокнистые частицы и агломераты путём абразивного износа, что существенно снижает затраты энергии на измельчение ПТФЭ, а также обеспечивает уменьшение его молекулярного веса и соответствующее изменение физико-механических свойств. Во второй стадии полученные волокнистые частицы и агломераты ПТФЭ подвергают аэромеханическому воздействию в условиях знакопеременного температурного режима, приводящему к их дальнейшему измельчению.

Следовательно, для переработки блочного ПТФЭ в порошок, кроме условий, указанных для РВА вообще, проектируемый агрегат должен обеспечивать абразивное измельчение блочного ПТФЭ, периодическое охлаждение газопылевой смеси и аспирацию внутреннего объема. Это достигается при помощи абразивного колеса и системы подачи жидкого азота, введенных в конструкцию РВА. Как упоминалось ранее, порошок ПТФЭ, получаемый при абразивном диспергировании, представляет собой преимущественно частицы в виде мельчайшей стружки и их агломераты, для измельчения которых РВА весьма эффективны.

Организация в объеме РВА вращающихся потоков частиц, движущихся в центробежном поле ротора, благоприятствует процессу диспергирования ПТФЭ, поскольку создаёт необходимые аэродинамические пульсации газопылевой среды, перемещает крупные частицы ПТФЭ на периферию агрегата, а также обеспечивает нагрев частиц и возможность их охлаждения в локализованной зоне. Что касается измельчения, то механизм его, как следует из работы [34], зависит от прочности материала. В органических высоко- и низкомолекулярных соединениях имеются два типа связей – прочные межатомные (ковалентные) связи внутри молекул и относительно слабые межмолекулярные (водородные), которые под действием механических напряжений рвутся в первую очередь, что приводит к разупорядочению, разрыхлению структуры веществ. Степень разупорядочения зависит от величины подведенной энергии и структуры вещества.



В РВА может быть предусмотрена возможность эффективной сепарации однородного по химическому составу порошка материала на фракции, различающиеся по массе, структуре или иным свойствам, обусловленным предысторией внешних воздействий на материал. С помощью РВА можно изменять форму частиц и, соответственно, насыпную плотность порошкового материала и его сыпучесть. Подобные агрегаты могут быть использованы для придания овальной формы частицам пластических масс, имеющих первоначально неправильную, «рваную» форму.

Наиболее достоверной гипотезой, объясняющей вихревой эффект, является «гипотеза взаимодействия вихрей», согласно которой процесс энергоразделения – это результат взаимодействия двух вихрей, перемещающихся вдоль оси навстречу друг другу:

- периферийного, вращающегося по закону потенциального вихря;
- приосевого, вращающегося по закону квазитвердого тела [35, 36, 37].

Определяющая роль в переносе энергии от осевых слоев к периферийным отводится турбулентным пульсациям – их радиальной составляющей. «Гипотеза взаимодействия вихрей» в турбулентности предполагает источник механической работы для переноса тепловой энергии в потоке. Даже на тех участках рабочего объема, где статическая температура у оси потока ниже температуры периферийных слоев, радиальные пульсации переносят теплоту вверх по радиусу. В макроскопическом масштабе турбулентное течение кажется совершенно беспорядочным или хаотическим, но в микроскопическом масштабе оно высокоорганизовано. Множество пространственных и временных масштабов, на которых разыгрывается турбулентность, соответствуют когерентному поведению миллионов и миллионов молекул. С этой точки зрения, переход от ламинарного течения к турбулентности является процессом самоорганизации. Часть энергии системы, которая в ламинарном течении находилась в тепловом движении молекул, переходит в макроскопическое организованное движение» [38].

Известно, что температура проявления теплофизических свойств полимеров (плавление, начало потери молекулярной массы) зависит от молекулярной массы [23]. Физико-механические свойства ПТФЭ определяются, в основном, молекулярной массой и степенью кристалличности полимера. В низкомолекулярных фазах полимера процессы



начинаются при меньших температурах. Нагревание до 180–200°C образцов теломеров со степенью полимеризации  $\leq 10-20$ , имеющих строение и свойства, близкие к таковым для ПТФЭ, приводит к размягчению фторполимера [39].

В результате исследований экспериментально подтверждена возможность получения микродисперсного порошка из блока ПТФЭ путем его абразивного изнашивания (размер полученных частиц ПТФЭ составил от  $0,2 \times 10^{-4}$  до  $0,6 \times 10^{-4}$  м). При этом алмазный абразивный инструмент обеспечил максимальную производительность процесса без нагрева обрабатываемого ПТФЭ при линейной скорости абразива 30х40 м/сек. Линейная скорость абразива является основным фактором, определяющим размер частиц ПТФЭ [33]. Очевидно, что абразивный износ разрушает макромолекулы ПТФЭ и, уменьшая молекулярную массу частиц ПТФЭ, соответственно, снижает температуру размягчения и плавления ПТФЭ.

## Проектирование

Проектирование РВА для реализации разработанной технологии осуществлялось поэтапно по мере усложнения конструкции, обеспечивающей все условия процесса диспергирования ПТФЭ.

Первый этап проектирования включал:

- изменение физико-механических свойств перерабатываемого ПТФЭ за счёт уменьшения его молекулярного веса в результате абразивного измельчения;
- получение волокнистых частиц ПТФЭ и их агломератов, по своим размерам приближающихся к частицам теломеров тетрафторэтилена;
- аэродинамический нагрев волокнистых частиц ПТФЭ в несущей газовой среде;
- генерирование пульсирующих аэродинамических сил во встречных турбулентных потоках;
- вихревое аэромеханическое диспергирование нагретых волокнистых частиц ПТФЭ.

Принципиальная схема аэромеханического дезинтегратора заимствована из литературы по технологии приготовления сыпучих дисперсных смесей для композиционных материалов. Такой вид диспергирования не связан с процессами химического разложения измельчаемого



материала, исключает его потери и вредное воздействие на окружающую среду. Аэромеханический дезинтегратор включает корпус цилиндрической формы с установленными в нем по внутреннему периметру отбойными гребнями – билами – и вращающийся в полости корпуса ротор с колесом, снабженным лопатками (внешне напоминающий колесо роторного вентилятора). Частицы блочного ПТФЭ, измельченные в абразивном диспергаторе, под действием центробежной силы подаются в рабочее пространство между колесом и отбойными гребнями РВА и подвергаются интенсивному циклическому аэромеханическому воздействию.

На первом этапе проектирования был разработан и изготовлен **1-й экспериментальный вариант** диспергирующей установки. Этот вариант включал собственно РВА, содержащий абразивный диспергатор (АД) и аэромеханический дезинтегратор (АМД), а также систему улавливания полученного порошка. Абразивный диспергатор и аэромеханический дезинтегратор, смонтированные на общем вале, в данном варианте образовывали единую сборочную единицу – ротор, размещающийся в полости корпуса, снабженного загрузочными каналами для подачи перерабатываемого ПТФЭ. Подача перерабатываемого ПТФЭ к рабочей поверхности абразивного диспергатора осуществлялась при помощи пневмоцилиндров.

Абразивный диспергатор представлял собой сборное металлическое колесо диаметром 350 мм и толщиной 100 мм. На боковой цилиндрической поверхности этого колеса были нанесены полосы алмазного порошка, закрепленного наплавленной металлической связкой (медной, никелевой). Абразивные полосы шириной 10 мм и с зазорами между ними также шириной 10 мм наклонены к образующей цилиндра под углом 45°. Такая ориентация абразивных полос обеспечивает безударное взаимодействие с обрабатываемым блоком ПТФЭ, предотвращает затирание измельченных частиц в указанной зоне и в сочетании с зазорами обеспечивает свободный отвод продуктов диспергирования из зоны абразивного взаимодействия в зону аэромеханического диспергирования, расположенную по периферийной окружности вращения (диаметру ометания) аэромеханического колеса дезинтегратора. Сформированная абразивная поверхность включала кристаллы алмаза, имеющие острые ребра, сопоставимые с размерами углерод-углеродных связей молекул ПТФЭ.

С целью обеспечения производительности абразивного износа блока ПТФЭ линейную скорость вращения абразивной поверхности обеспечи-



вали не менее 30 м/сек [33], изнашиваемую поверхность массива ПТФЭ располагали под углом  $90^\circ$  к плоскости вращения абразивной поверхности, при этом усилие поджатия массива ПТФЭ к абразивной поверхности сохранялось стабильным. Частицы ПТФЭ из зоны абразивного износа удалялись и перемещались в зону аэромеханического диспергирования под воздействием центробежных и аэродинамических сил, генерируемых вращающимся ротором.

Абразивное колесо вращается с номинальным числом оборотов  $n = 2750$  об/мин. Вращаясь, абразивное колесо возбуждает в зазоре с корпусом кольцевое, вихревое движение воздуха, подхватывающего частицы ПТФЭ и образующего воздушный аэрозоль, который по тангенциальному каналу подается в зону аэромеханического диспергирования. Движение аэрозоля обеспечивается не только вращением абразивного колеса, но и подсосом воздуха из кольцевого зазора между валом ротора и корпусом с помощью отсасывающей системы.

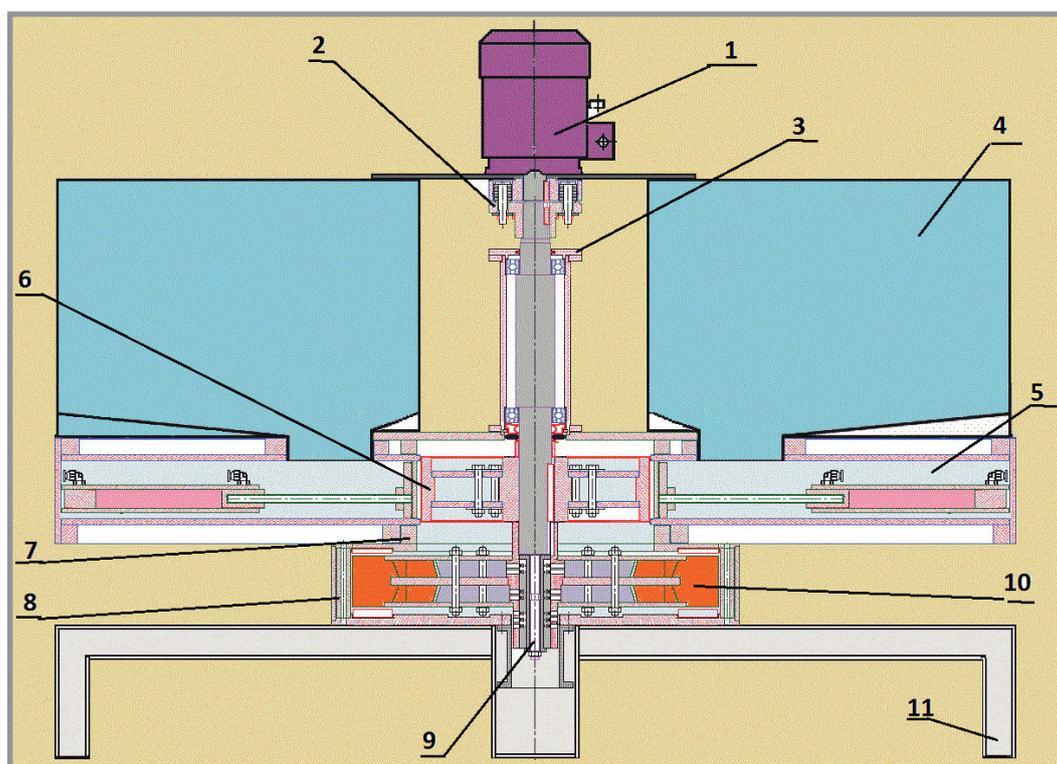
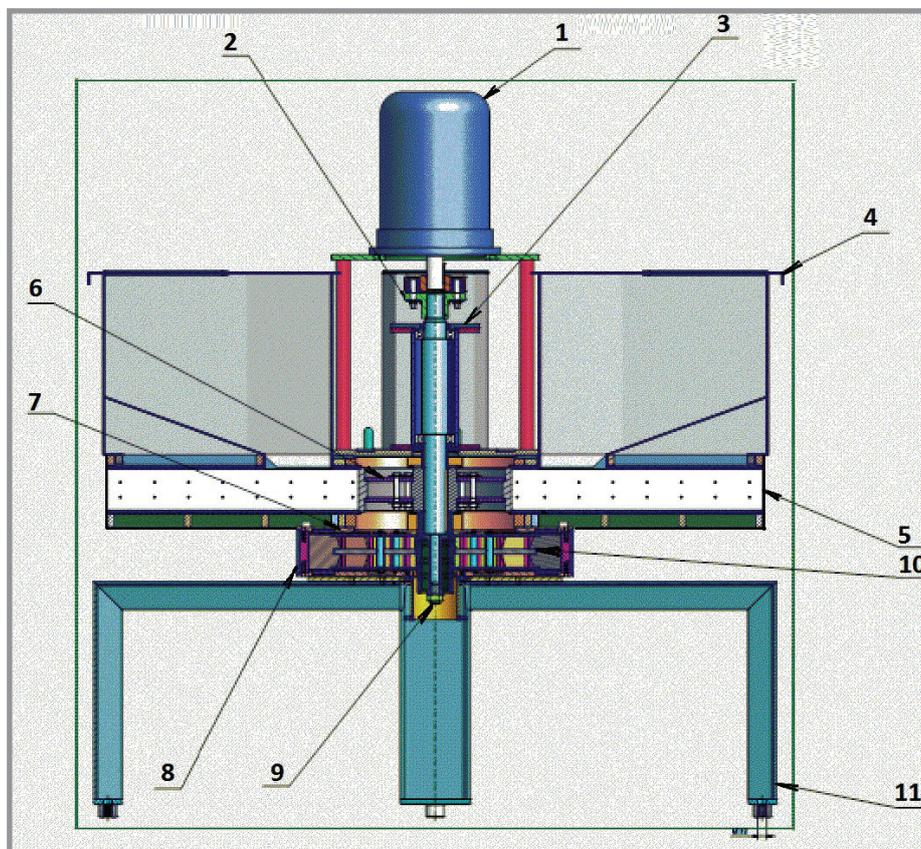


Рис. 7. Схема роторно-вихревого дезинтегратора:

- 1 – электропривод; 2 – муфта; 3 – стакан; 4 – бункер; 5 – загрузочное устройство;  
6 – абразивный диспергатор; 7 – корпус; 8 – било; 9 – канал отвода частиц;  
10 – колесо аэромеханического дезинтегратора; 11 – станина



**Рис. 8. Сборочный чертёж роторно-вихревого дезинтегратора:**

- 1 – электропривод; 2 – муфта; 3 – стакан; 4 – бункер; 5 – загрузочное устройство;  
 6 – абразивный диспергатор; 7 – корпус; 8 – било; 9 – канал отвода частиц;  
 10 – колесо аэромеханического дезинтегратора; 11 – станина

Как показали автономные опыты, при абразивном диспергировании с линейной скоростью абразива до 30 м/сек процесс не сопровождается заметным тепловыделением и не требует большого усилия давления обрабатываемого блока ПТФЭ на режущую поверхность абразивного колеса. Для повышения эффективности удаления волокнистых частиц из зоны абразивного износа рабочую поверхность абразивного колеса формируют профилированной, при этом высоту профиля выполняют равной толщине слоя металлической связки, удерживающей твердые кристаллы.

Экспериментально установлено [33], что наиболее целесообразным для изготовления абразивной поверхности является применение алмазного зерна в диапазонах от 800 до 40 мкм и от 63 до 0,5 мкм на гальванической металлической связке, представляющей собой сплавы меди,



олова, цинка, алюминия, никеля и других металлов. Эффективность алмазной абразивной поверхности во много раз выше по сравнению с абразивной поверхностью из зеленого карбида кремния. Алмазная абразивная поверхность не засаливается, обеспечивает высокую производительность и продолжительность обработки.

Далее измельченные частицы ПТФЭ отжимаются воздушной вихревой структурой колеса ротора к выхлопным отверстиям у оси вращения ротора и поступают в виде аэрозоля в продуктопровод, ведущий в систему улавливания установки диспергирования.

Во второй стадии процесса диспергирования полученные волокнистые частицы и агломераты ПТФЭ совместно с несущей газовой средой поступают в зону аэромеханического измельчения, где осуществляются:

- аэродинамический нагрев газодисперсной смеси, содержащей волокнистые частицы ПТФЭ;
- вихревое аэромеханическое диспергирование волокнистых частиц под воздействием пульсирующих аэродинамических сил во встречных турбулентных потоках;
- диспергирование, классификация и удаление полученных ультрадисперсных частиц ПТФЭ при одновременном воздействии на них центробежных и центростремительных сил.

Нагревание волокнистых частиц обеспечивается за счёт аэродинамического нагрева несущей газовой среды в пограничном слое с поверхностью аэродинамического ротора предлагаемого устройства. Эффект повышения температуры воздуха достигается вследствие трения воздуха о лопатки ротора и трения молекул воздуха и частиц ПТФЭ между собой.

Аэродинамический нагрев – результат того, что налетающие на тело молекулы газа тормозятся вблизи тела. Существуют две формы аэродинамического нагрева: конвективная и радиационная. Конвективный нагрев происходит при торможении молекул воздуха в пограничном слое, непосредственно у поверхности тела. Энергия хаотического движения молекул газа возрастает, что ведет к росту температуры газа в этом слое и аэродинамическому нагреву тела. Из областей газа с повышенной температурой тепло передаётся движущемуся телу (частицам ПТФЭ), благодаря чему происходит поступление энергии к материалу и его аэродинамический нагрев. Радиационный нагрев – это перенос тепла за счет излучения молекул газа. Соотношение между конвекционными и радиа-



ционными тепловыми потоками зависит от скорости движения объекта. До значений первой космической скорости преобладает конвективный нагрев. При исследовании термического поведения дисперсного ПТФЭ выявлено, что в отличие от блочного ПТФЭ, который, как известно, является термостойким ( $T_{пл} = 327^\circ\text{C}$ ,  $T_{разл} = 425^\circ\text{C}$ ), потеря веса при нагревании дисперсного порошка ПТФЭ начинается уже при температуре  $50^\circ\text{C}$ . Благодаря этому эффекту возможно размягчение волокнистых частиц ПТФЭ при сравнительно низких температурах, что способствует их дальнейшему аэромеханическому измельчению.

В процессе аэромеханического диспергирования волокнистых частиц ПТФЭ в предложенном РВА формируется газодисперсная система, включающая несущую газовую среду и ультрадисперсные частицы ПТФЭ различных размеров и массы. Устойчивость газодисперсной системы зависит от скорости осаждения частиц. Скорость движения частиц зависит (с физической точки зрения) от сил, действующих в среде, и сопротивления среды. Сопротивление среды ( $P$ ) описывается законом Ньютона:

$$P = KSP\gamma \frac{W^2}{2}, \quad (1)$$

где  $S$  — проекция поперечного сечения частицы по направлению движения,  $\text{м}^2$ ,  $P\gamma$  — плотность газовой среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ,  $W$  — скорость движения частицы,  $\text{м}/\text{с}$ ,  $K$  — коэффициент сопротивления, который является функцией критерия Рейнольдса ( $Re$ ) и определяется опытным путем.

Поскольку для ультрадисперсных частиц центробежная сила  $F_{цс}$  оказывается равной силе сопротивления газовой среды

$$F = F_{цс} = F_r, \quad (2)$$

с целью сепарации диспергируемых частиц ПТФЭ и аспирационного удаления ультрадисперсной фракции совместно с газодисперсной системой при помощи насоса создают центробежный газовый поток, действующий против центробежной силы, при этом скорость центробежного потока задают

$$V_{цн} = m\omega^2 R / 6\pi r\eta, \quad (3)$$



где  $V_{un}$  – установившаяся скорость центростремительного газового потока с ультрадисперсными частицами ПТФЭ (м/с),  $\eta$  – вязкость несущей среды (газа) (Па с),  $r$  – радиус ультрадисперсной частицы ПТФЭ (м),  $R$  – радиус-вектор тела ультрадисперсной частицы,  $m$  – масса ультрадисперсной частицы,  $\omega$  – угловая скорость вращения.

При этом частицы меньших размеров увлекаются газовым потоком к центру вращения, а частицы большого размера центробежной силой отбрасываются к периферии, в зону диспергирования, где они подвергаются дальнейшему измельчению.

Разработанный РВА работает следующим образом.

Массив блочного ПТФЭ под действием постоянного усилия поджата из питателей 5 подаётся на абразивную поверхность абразивного ротора 6, вращающуюся с линейной скоростью 30–40 м/сек. На абразивной поверхности происходит абразивный износ массива ПТФЭ с образованием волокнистых частиц ПТФЭ и их агломератов. Удержание массива ПТФЭ в зоне абразивного износа обеспечивается при помощи изнашивающегося обтюратора, выполненного из листового или трубчатого ПТФЭ. Удаление волокнистых частиц ПТФЭ и их агломератов из зоны абразивного износа обеспечивается воздушным потоком через зазоры между обтюратором и профилированной абразивной поверхностью ротора 6. Далее, под воздействием центробежной и аэродинамической сил, волокнистые частицы ПТФЭ и их агломераты отбрасываются в периферийную зону абразивного ротора 6 к стенке корпуса, а затем – в зону аэромеханического диспергирования. При вращении ротора в зазоре между ротором и корпусом возникают области интенсивного вихревого движения газа, вызванные лопатками 9, отбойными гребнями 10 и рёбрами на стенках корпуса. Лопатки 9, отбойные гребни 10 и рёбра на стенках корпуса образуют вал сообщенных между собой микрокамер измельчения, в которых интенсивность вихревого движения увеличивается по мере роста линейной скорости ротора. С увеличением числа оборотов ротора повышается интенсивность вихревого потока, достигая требуемого предела, определяемого прочностью измельчаемого ПТФЭ и требуемыми размерами частиц. Перемещаясь совместно с газовой средой в зоне аэромеханического диспергирования, волокнистые частицы ПТФЭ и их агломераты нагреваются, измельчаются, овализируются и выносятся через разгрузочное устройство 12, расположенное по оси устройства.



Таким образом, в пространстве между отбойными стержнями корпуса могут существовать два-три вихря, получающих энергию вращения со стороны лопаток ротора при линейной скорости 83,05 м/сек. Зарождающийся вихрь является динамической структурой, которая по спирали к центру вращения втягивает наружные слои воздуха. При этом втягиваемые слои утоньшаются и их линейная скорость вращения увеличивается пропорционально утоньшению. Скорость вращения вихря в центре в идеальном случае должна быть равна бесконечности, однако в самом центре вихря вращения не может существовать. В этих условиях происходит раскрутка ядра вихря до скорости в несколько раз большей, чем скорость наружных слоев вихря, вследствие чего в ядре вихря под действием центробежных сил возникает разрежение. Таким образом, вращение наружных слоев вихря в ограниченном объеме обуславливает действие центростремительных сил, а вращение ядра обуславливает действие центробежных сил. Эти силы уравниваются на определенном радиусе вихря, где газ, сжатый с двух сторон, вращается со скоростью в несколько раз большей, чем в наружной части, подвергающейся вращательному воздействию лопаток аэромеханического дезинтегратора. В предельном случае линейная скорость в пограничном сжатом слое вихря может достичь скорости звука. В этом случае давление в ядре вихря понижается в критическое число раз по сравнению с давлением вокруг вихря. Для воздуха это давление в ядре вихря составит 0,528 кгс/см<sup>2</sup>. Таким образом частицы измельчаемого материала дрейфуют в пространстве между ротором и корпусом аэромеханического дезинтегратора и за характерное время жизни  $\tau_2 = 0,36$  мсек пересекают зоны градиентов скорости и давления и подвергаются ударам лопаток ротора и соударяются с корпусом РВА с максимальной скоростью 83,05 м/сек.

Если выполнить расстояние между отбойными стержнями корпуса немного большими, чем ширина отбойного стержня

$$t_e = 1,3t_\sigma, \quad (4)$$

то во впадинах между отбойными стержнями могут существовать постоянные вихри, которые после прохода очередной лопатки ротора зарождаются и увеличиваются в поперечнике, а при проходе следующего била поджимаются и получают от ротора дополнительную вращатель-



ную энергию. Такое динамически устойчивое, пульсирующее состояние вихря, является наиболее приемлемым с точки зрения эффективности процесса измельчения. Для уменьшения влияния тормозящего эффекта по торцам вихрей высоту отбойных стержней целесообразно принимать больше, чем промежуток между ними в три–пять раз. Число лопаток ротора определяется при данной линейной скорости вращения временем роста вихрей во впадинах между отбойными стержнями корпуса. Ориентировочно число лопаток ротора можно принять равным  $1/5$ – $1/10$  от числа отбойных стержней корпуса. При этом время существования вихря в промежутке между отбойными стержнями корпуса составит 2,84 м/сек, что соответствует частоте 0,5 кГц. При диаметре корпуса РВА, равном 0,62 м, число бил корпуса составит 63.

Конструкция РВА предусматривает размещение в едином корпусе ротора, состоящего из двух колес: меньшее – на входе, большее – на выходе. Такая компоновка обеспечивает самовентиляцию РВА. Интенсивность самовентиляции определяет степень измельчения частиц ПТФЭ из аппарата абразивного измельчения. Изменение интенсивности вращения ротора РВА от приводного электродвигателя обеспечивается путём регулирования инвертором интенсивности вращения ротора электродвигателя. Изменение дисперсности измельчаемых частиц обеспечивается размером суммарной проточной площади разгрузочных отверстий в зоне у оси вращения большего колеса ротора. Выбор РВА для измельчения и компактизации частиц обусловлен многофакторным характером механического воздействия на частицы, при котором преимущественно продолговатая форма частиц, поступающих от абразивного колеса РВА в зону аэромеханического диспергирования, будет способствовать их делению на части, имеющие компактную форму, близкую к сферической.

По результатам автономных экспериментальных работ, для дальнейшего проектирования РВА были определены ориентировочные кинематические параметры процесса абразивного диспергирования.

Число оборотов  $n$  абразивного колеса принято равным числу оборотов электрического привода 2750 об/мин или 45,83 об/сек. При диаметре абразивного колеса 350 мм линейная скорость вращения абразивного колеса относительно обрабатываемого материала составляет 50,37 м/сек.

При шаге микронеровностей абразивного колеса примерно  $2 \cdot 10^{-4}$  м (0,2 мм) количество режущих выступов  $n_p = 5,495 \times 10^3$ . При таких ус-



ловиях частота воздействия абразивного колеса на брусок ПТФЭ  $f_a = 0,252$  МГц. Поскольку ПТФЭ имеет весьма низкую прочность, достигнутая частота воздействия режущих элементов абразивного колеса достаточно эффективна для обработки блока ПТФЭ без приложения дополнительных усилий.

Производительность процесса абразивного диспергирования определена расчётным методом на основании экспериментальных данных и составляет при ширине абразивной поверхности, равной 100, при скорости резания 50,37 м/сек – 2333 г/час. При односменной работе месячная выработка – 373,28 кг. Разработанная установка была изготовлена в единственном экземпляре с целью отработки технологии и выявления особенностей конструкции разработанного агрегата в процессе диспергирования ПТФЭ. Система охлаждения в 1 варианте экспериментальной диспергирующей установки отсутствовала. Экспериментальная эксплуатация диспергирующей установки в целом показала удовлетворительные результаты. В частности, была достигнута степень измельчения ПТФЭ до размера частиц в диапазоне 50–20 мкм, однако планируемая производительность диспергирующей установки не была достигнута по причинам, обусловленным конструкцией изготовленного агрегата. Анализ результатов экспериментальной отработки технологии позволил выявить причины, снижающие эффективность работы диспергирующей установки:

- торможение ротора при подаче ПТФЭ;
- проскальзывание абразивной поверхности по изнашиваемой поверхности ПТФЭ;
- высокое содержание волокнистых частиц и слипание частиц в агломераты;
- недостаточная степень измельчения;
- приложение подающего усилия перпендикулярно к образующей абразивного колеса;
- налипание частиц ПТФЭ на изнашиваемой поверхности ПТФЭ;
- недостаточная линейная скорость лопаток аэромеханического дезинтегратора, аэродинамический нагрев и поляризация волокнистых частиц ПТФЭ;
- недостаточная частота генерации и схода вихрей.



## Второй этап проектирования

На втором этапе проектирования была произведена конструктивная переработка РВА, устраняющая указанные недостатки и обеспечивающая:

- существенное повышение производительности РВА;
- снижение поляризации и оптимизацию формы частиц ПТФЭ за счёт релаксации внутримолекулярных напряжений в частицах ПТФЭ при механическом воздействии в условиях аэродинамического нагрева и периодического охлаждения до  $-196^{\circ}\text{C}$ ;
- разделение получаемых ультрадисперсных частиц ПТФЭ по массе и удаление получаемых ультрадисперсных частиц ПТФЭ при одновременном воздействии на них центробежных и центростремительных сил.

С целью повышения степени измельчения и производительности РВА было решено увеличить скорость взаимодействия измельчаемых частиц с элементами РВА. Для этого абразивный диспергатор (АД) и аэромеханический дезинтегратор (АМД) были выполнены отдельно на двух соосно расположенных валах, вращающихся в противоположные стороны в едином замкнутом объёме, причём каждый вал снабжён собственным электроприводом. Абразивное колесо было увеличено как в диаметре, так и по высоте, что позволило увеличить его рабочую абразивную поверхность, расположив её наклонно. Отбойные стержни были закреплены в нижней части абразивного колеса, что обеспечило возможность их встречного вращательного движения относительно аэродинамического колеса. Кроме того, были увеличены диаметр аэродинамического колеса до 1 м и высота лопаток. Загрузочные питатели расположили вертикально в упор к наклонной абразивной поверхности, что существенно снизило нагрузку на вращающийся вал. Учитывая термонапряженный режим работы РВА, в его конструкцию была введена специально разработанная система охлаждения.

Переработанная конструкция РВА включала:

- абразивный блок, образованный верхним полукорпусом 1 и абразивным ротором 6, расположенными вертикально и соосно, снабжённый системой охлаждения 7, вертикально расположенными питателями 5 и автономным приводом 4, при этом абразивный ротор 6 выполнен в виде колеса с коническим абразивным ободом



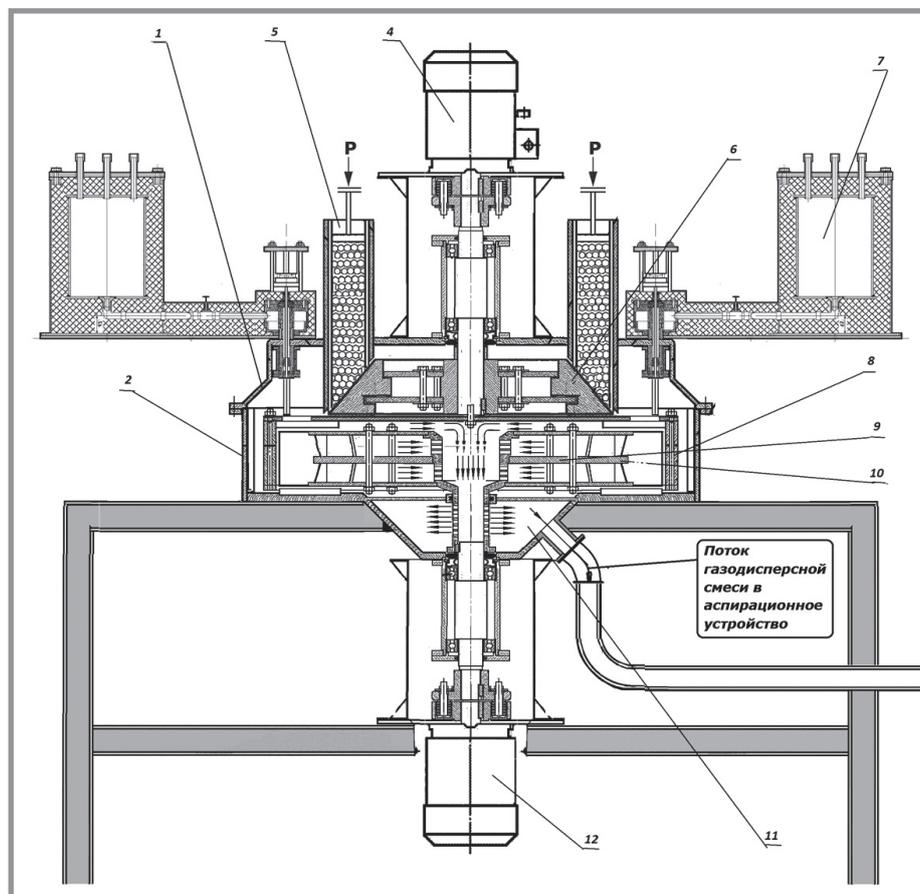


Рис. 9. 2-й экспериментальный вариант РВА

и трапецеидальными отбойными стержнями 8, расположенными по внешней окружности ротора;

- аэродинамический блок, образованный вертикально и соосно расположенными нижним полукорпусом 2 и аэродинамическим ротором 9, выполненным в виде полостного аэродинамического колеса с лопатками 10, и снабжённый разгрузочным устройством 11 и автономным приводом 12.

Абразивная поверхность абразивного ротора 6 покрыта режущими кристаллами, коническая поверхность абразивного ротора выполнялась профилированной с центральным углом не менее  $90^\circ$ , при этом разновысокость профиля обеспечивалась близкой размеру получаемых волокнистых частиц ПТФЭ, количество выступов профиля, покрытых абразивными кристаллами, создавалось равным количеству впадин, а угол наклона профиля – не менее  $45^\circ$  в проекции на ось вращения.



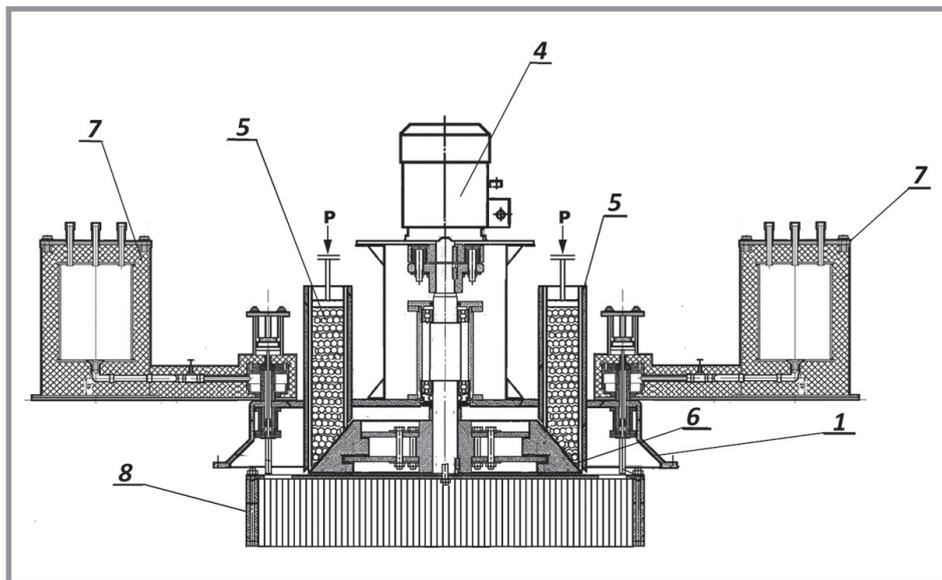


Рис. 10. Абразивный блок

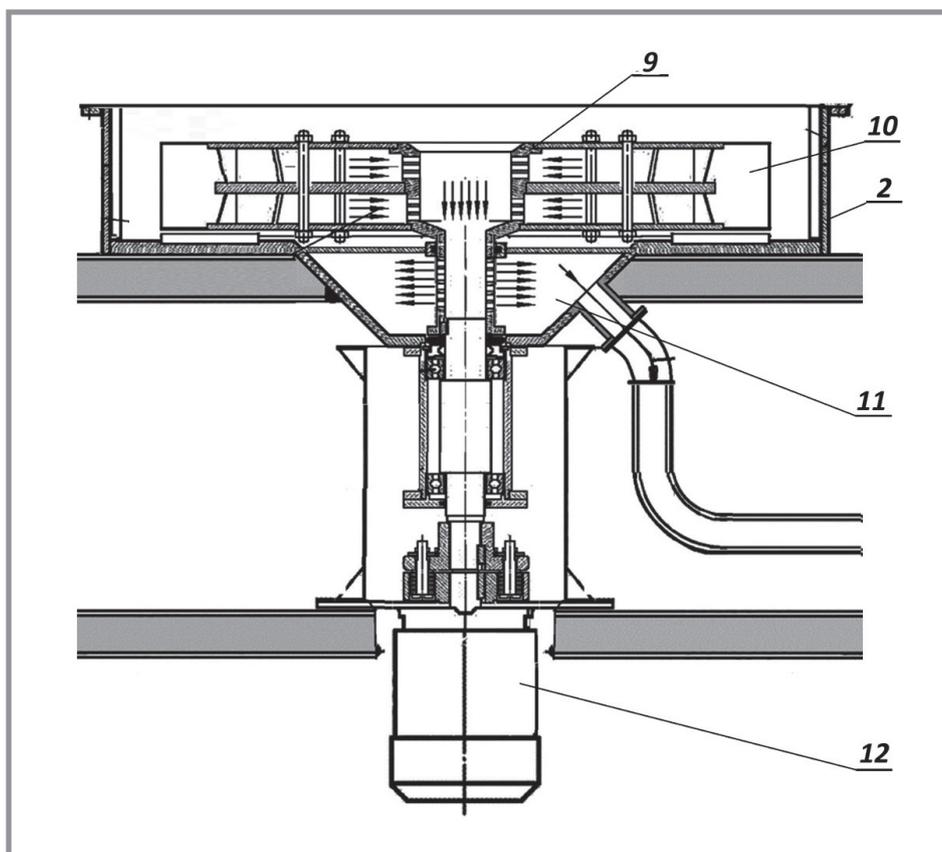


Рис. 11. Аэродинамический блок

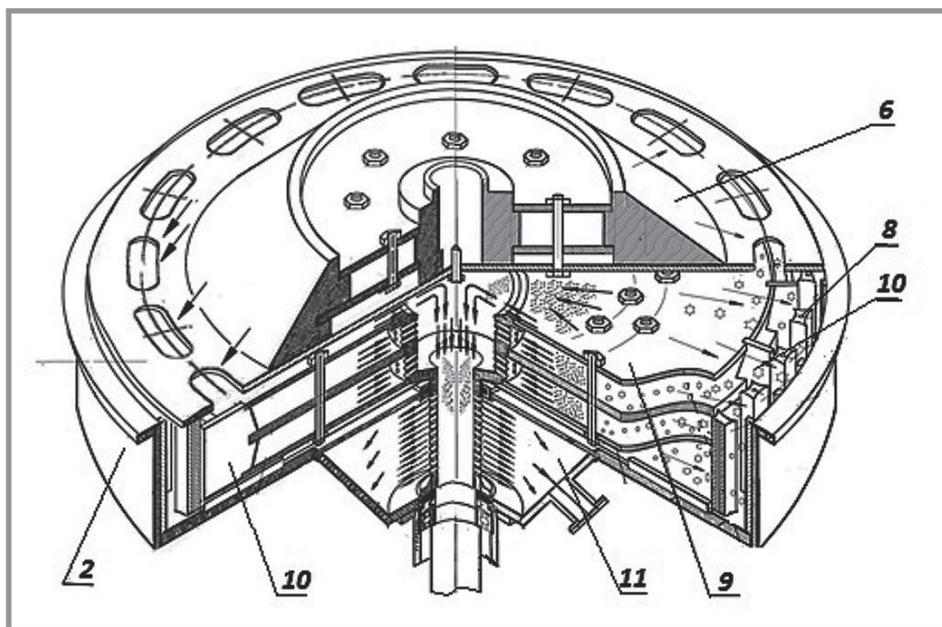


Рис. 12. Аэродинамический блок в сборе с абразивным ротором

Число оборотов  $n$  абразивного ротора 6 и аэродинамического ротора 9, вращающихся во встречных направлениях, как и в первом варианте РВА, принято равным числу оборотов каждого электропривода 45,83 об/сек. Оценка производительности 2-го экспериментального варианта РВА показала, что при диаметре абразивной поверхности 500 мм и ширине абразивной поверхности 140 мм линейная скорость абразива относительно обрабатываемого блока ПТФЭ равна 71,9 м/сек; при шаге микронеровностей абразивного колеса примерно 0,2 мм количество режущих выступов  $7,85 \times 10^3$ ; частота воздействия абразива на брусок ПТФЭ – 0,36 МГц. При односменной работе месячная выработка составит 532,67 кг. При диаметре аэродинамического колеса 1000 мм линейная скорость вращения  $V_1$  составит 143,9 м/сек. Частота схода вихрей с лопаток аэродинамического колеса при этой скорости составит 72,53 кГц. Поскольку обе стадии процесса ограничены единым объемом, потери перерабатываемого материала между стадиями исключаются, и производительность РВА может оцениваться по стадии абразивного диспергирования.

ПТФЭ является неполярным полимером, но на его поверхности и в приповерхностном объеме существуют дипольные участки молекул, создающие стабильные во времени электростатические свойства. Характерным



для любого диэлектрика процессом, возникающим при воздействии на него механического напряжения, является *поляризация* – ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул. Релаксация, переход в равновесное – неполяризованное, незаряженное состояние – характерны для любого электрета. Стимулирование релаксации внутримолекулярных напряжений, соответствующее снижение поляризации в частицах ПТФЭ и переход частиц в равновесное неполяризованное, незаряженное состояние при воздействии знакопеременных механических и температурных нагрузок способствуют оптимизации формы получаемых ультрадисперсных частиц и, соответственно, получению сыпучего порошка ПТФЭ.

В процессе аэромеханического диспергирования в разработанном РВА волокнистые частицы ПТФЭ нагреваются за счёт трения и ударных воздействий. Вязкость ПТФЭ соответственно понижается, что способствует диспергированию частиц, при этом возрастает и перераспределяется энергия теплового движения молекул – происходит релаксация внутримолекулярных напряжений. Резкое охлаждение ультрадисперсных частиц ПТФЭ обеспечивает их закаливание (фиксацию аморфной структуры в неполяризованном виде). В результате многократного циклического повторения перечисленных процессов происходит деполяризация частиц ПТФЭ и оптимизация (приближение к сферической) формы ультрадисперсных частиц.

### Третий этап проектирования

Дальнейшее совершенствование разработанного РВА предполагало повышение его эффективности в зоне аэромеханического диспергирования.

Как упоминалось ранее, волокнистые частицы ПТФЭ и их агломераты под воздействием центробежной и аэродинамической сил отбрасываются в периферийную зону абразивного ротора 6 и стенке корпуса, а затем – в зону аэромеханического диспергирования.

В зазоре между лопатками 9 вращающегося аэродинамического колеса движущимися навстречу отбойными стержнями 10 абразивного колеса и рёбрами на стенках корпуса РВА возникают области интенсивного вихревого движения газа. Вал образующихся сообщенных между собой микрокамер измельчения, в которых интенсивность вихревого



движения увеличивается по мере роста линейной скорости ротора, способствует увеличению частоты схода вихрей до частоты, близкой к частоте ультразвуковых колебаний. С целью достижения максимальной интенсивности подачи энергии в зоне аэродинамического диспергирования на единицу массы диспергируемого материала за счёт создания высокочастотного пульсирующего аэродинамического поля было предложено заменить неподвижные отбойные стержни подвижными, относительно собственной оси лопастными элементами (турбинами), вращающимися в направлениях, встречных относительно вращения аэродинамического колеса, а также соседних турбин. Предложенные турбины располагают в обойме, жёстко соединённой с нижним полукорпусом, по двум concentрическим окружностям, охватывающим периметр ометания лопаток аэродинамического колеса. Вращение турбин, расположенных в каждой из concentрических окружностей, обеспечивается посредством фрикционных передач от абразивного ротора 6 и аэродинамического ротора 9 соответственно.

Компоновка зоны аэродинамического диспергирования с применением турбин и с применением отбойных стержней в сравнении показана на рис. 13, 14, 15.

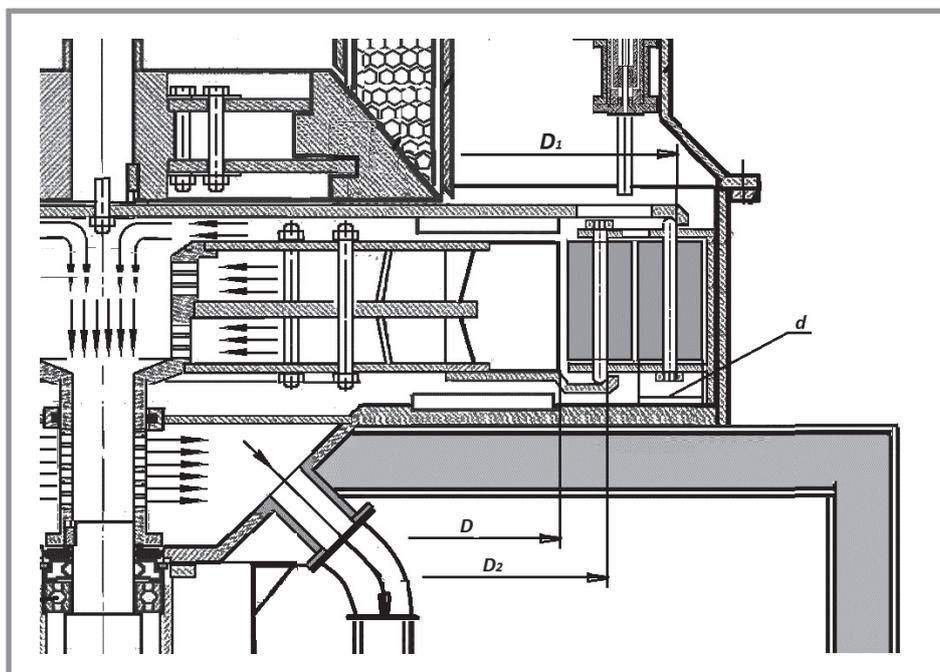


Рис. 13. Структура зоны аэродинамического диспергирования РВА с применением турбин



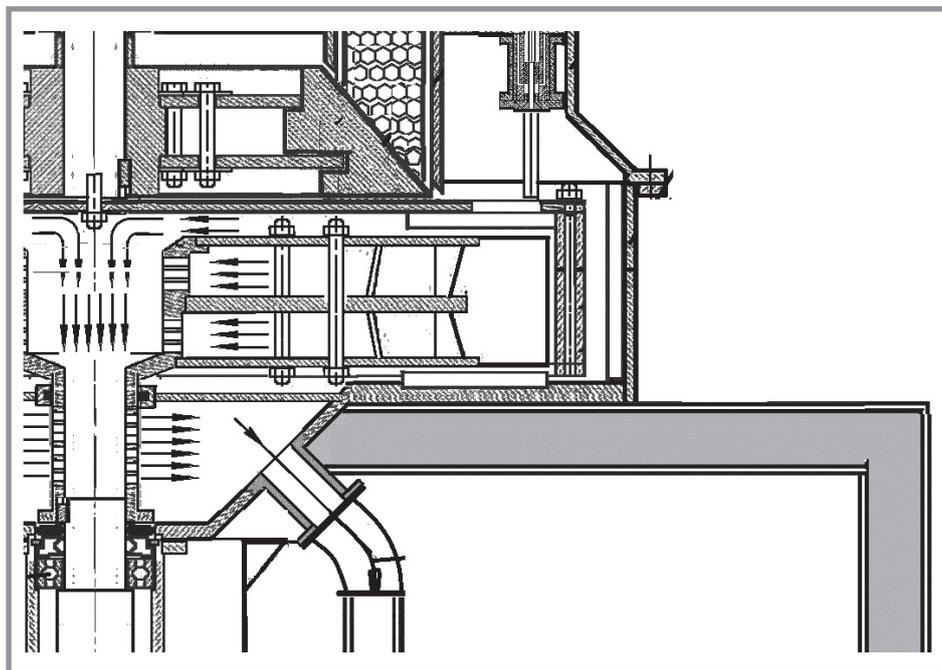


Рис. 14. Структура зоны аэродинамического диспергирования РВА с применением отбойных стержней

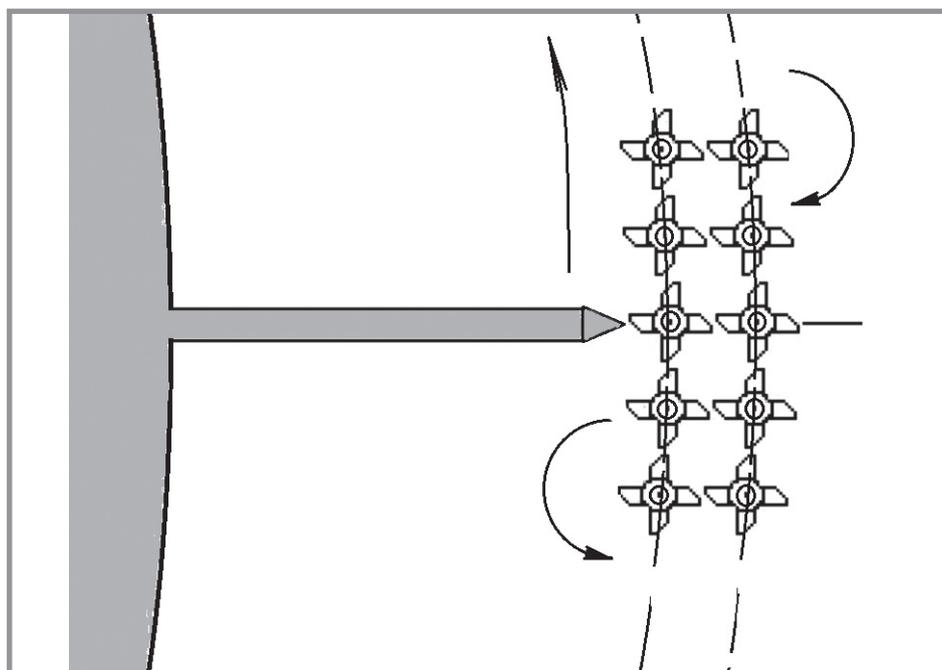


Рис. 15. Схема зоны аэромеханического диспергирования РВА, оснащённого турбинами



Применение турбин взамен отбойных стержней позволяет за счёт увеличения линейных скоростей вращения абразивного колеса до 158,30 м/сек и аэродинамического колеса до 158,30 м/сек обеспечить суммарную линейную скорость около 310 м/сек, а линейную скорость вращения турбин, расположенных по двум концентрическим окружностям диаметром 1050 и 1100 мм, до 785 м/сек. Частота взаимодействия лопаток турбин, вращающихся во встречных направлениях, составляет 6280 Гц и, соответственно, частота схода вихрей составляет 25120 Гц. Перемещаясь совместно с газовой средой в зоне аэромеханического диспергирования РВА, оснащённого турбинами, волокнистые частицы ПТФЭ и их агломераты подвергаются повышенному импульсному воздействию газовой среды как в зазоре между встречно вращающимся аэродинамическим колесом и периметрически расположенными турбинами, так и в зазорах между каждой парой вращающихся навстречу друг другу турбин. Это многократно повышает интенсивность подачи энергии на единицу массы диспергируемого ПТФЭ в зоне аэродинамического диспергирования и, соответственно, интенсифицирует диспергирование волокнистых частиц ПТФЭ.

## Заключение

Разработка и экспериментальная отработка представленной технологии проводилась с целью утилизации отходов ПТФЭ, но в процессе выполнения работ была произведена оценка возможности её применения для утилизации отходов других термопластов, в том числе изделий медицинского назначения с учётом переработки конструкции РВА под конкретные процессы. С целью защиты интеллектуальной собственности сотрудниками предприятия ООО «ТАРК» (Украина) и научно-технического центра Polymate (Израиль) был зарегистрирован патент [40].



**УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ!**

**ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАТЕРИАЛА ДАННОЙ СТАТЬИ  
ПРОСИМ ДЕЛАТЬ БИБЛИОГРАФИЧЕСКУЮ ССЫЛКУ НА НЕЁ:**

*Грязнов И.В., Фиговский О.Л.* Новая технология изготовления полимерных нанопорошков. Часть II // Нанотехнологии в строительстве. – 2015. – Том 7, № 6. – С. 28–57. – DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2015-7-6-28-57](https://dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2015-7-6-28-57).

**DEAR COLLEAGUES!**

**THE REFERENCE TO THIS PAPER HAS THE FOLLOWING CITATION FORMAT:**

*Gryaznov I.V., Figovsky O.L.* The new technology for manufacturing polymer nanopowder. Part II. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2015, Vol. 7, no. 6, pp. 28–57. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2015-7-6-28-57](https://dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2015-7-6-28-57).

**Библиографический список:**

1. Европа в цифрах. – Річник Євростата. – 2006 – 2007. – 371 с.
2. *Супруненко О.* Мусорная эра от рассвета до заката // Экология и Общество. – 2006. – № 4.
3. Остров из мусора в Тихом океане уже превысил в два раза территорию США // Информационный дайджест «Ноосферогенез» (на пути к устойчивому развитию человечества). – 2008 г. – № 3, рубрика «Экология».
4. *Чегодаев Д.Д., Наумова З.К., Дунаевская Я.С.* Фторопласты. – Л.: Госхимиздат, 1971. – 192 с.
5. *Бузник В.М.* Фторполимеры: состояние отечественной химии фторполимеров, перспективы развития // Российский химический журнал (журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2008. – Т. LII, № 3.
6. *Борщев В.Я.* Оборудование для переработки сыпучих материалов: учеб. пособие. – М.: Издательство «Машиностроение-1», 2006. – 208 с.
7. *Пугачев А.К.* Переработка фторопластов в изделия: Технология и оборудование / А.К. Пугачев, О.А. Росляков. – Л.: Химия, 1987. – 168 с.
8. Материалы на основе модифицированного политетрафторэтилена / Г.Н. Горбачевич и др. // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2008. – Ч. 2. – С. 29–30.
9. *Виллемсон А.Л.* Современное состояние и перспективы мирового рынка фторполимеров // Международные новости мира пластмасс. – 2008. – № 11–12. – С. 20–23.



10. Оптимизационная технология функциональных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена / В.А. Струк и др. // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития: монография. – Гродно: ГГАУ, 2008. – С. 302–315.
11. Герметизирующие композиты на основе политетрафторэтилена с повышенной износостойкостью / Г.Н. Горбачевич и др. // Композиционные материалы в промышленности: материалы XXVIII междунар. конф. – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2008. – С. 64–70.
12. Струк В.А. и др. Методология формирования функциональных наноматериалов на основе политетрафторэтилена // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: материалы VIII междунар. промышл. конф. – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2008. – С. 48–54.
13. Курявый В.Г. Морфологическое строение продуктов пиролиза ультрадисперсного политетрафторэтилена / В.Г. Курявый, А.К. Цветников, А.В. Горбунов, В.М. Бузник // Перспективные материалы. – 2002. – № 6. – С. 72–74.
14. Бузник В.М. Ультрадисперсный политетрафторэтилен как основа для новых перспективных материалов / В.М. Бузник, А.К. Цветников // Вестник ДВО РАН. – 1993. – № 3. – С. 39.
15. Седлис Л.В. Теломеры тетрафторэтилена. – Москва: НИИТЭХИМ, 1974. – 45 с.
16. Charlesby A. The Decomposition of Polytetrafluoroethylene by Pile Radiation / Charlesby // Great Britain Atomic Energy Research Establishment AERE M/R. – 1952. – 296 p.
17. Currie J. A., Pathmanand N. Anal. Calorim., 3 (1974) 629.
18. Попова Г.С., Будтов В.П., Рябикова В.М. и др. Анализ полимеризационных пластмасс. – Ленинград: Химия, 1988.
19. Корбакова А.И., Макулова И.Д., Марченко Е.Н. и др. Токсикология фторорганических соединений и гигиена труда в их производстве. – Москва: Медицина, 1975.
20. Благодарная О.А. Гигиена труда в современных производствах по переработке фторопласта-4 // Гигиена труда в химической и химико-фармацевтической промышленности / Н. Ф. Измерова. – Москва, 1976. – С. 115–123.
21. Шадрина Н.Е., Клещева М.С., Логинова Н.Н. и др. Анализ карбоцепных фторополимеров методом пиролитической газовой хроматографии // Журнал аналитической химии. – 36, 6 – 1981. – 1125.
22. Morisaki S. Thermochim. acta. – 25, 2 – 1978 – 171.
23. Мадорский С. Термическое разложение органических полимеров. – Москва: Мир, 1967. – С. 328.
24. Дегтева Т.Г., Седова И.М., Хамидов Х.А., Кузьминский А.С. Окисление фторсодержащих полимеров // Деп. в Узб. хим. журн. – Ташкент, 1971. – № 3699-71.
25. Фторполимеры / под ред. Л.А. Уолла. – М.: Мир, 1975. – 448 с.
26. Машков Ю.К. Трибофизика и свойства наполненного фторопласта / Ю.К. Машков. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 1997. – 250 с. – RU 2528054.
27. Уминский А.А., Цветников А.К., Ипполитов Е.Г., Погодаев В.П., Кедринский И.А., Соболев Г.Л., Боровнев Л.М. Способ получения полифторуглерода / А. с. 1662100 РФ, МКИ 5 C08G 113/18.



28. *Цветников А.К., Уминский А.А., Царев В.А.* Установка для переработки политетрафторэтилена: П. 1763210 РФ, МКИ В29В 17/00. – 4 с.
29. *Цветников А.К.* Установка для переработки политетрафторэтилена: П. 2035308 РФ, МКИ В29В 17/00 /. 4с., – П. 1763210 РФ, МКИ В29В 17/00.
30. *Бузник В.М.* Диспергирование политетрафторэтилена для рационального использования материала / В.М. Бузник, А.К. Цветников, Л.А. Матвеевко // *Химия в интересах устойчивого развития.* – 1996. – № 4. – С. 489.
31. *Цветников А.К., Бузник В.М., Матвеевко Л.А.* Способ получения тонкодисперсного ПТФЭ и содержащая его масляная композиция / П. 2100376 РФ, МКИ 6 С08F 114/26, С08J 11/04, 11/10.
32. *Филатов В.Ю., Фукс С.Л., Суханова Е.Н., Казиевков С. А., Хитрин С.В.* Способ переработки фторопластов и материалов, их содержащих, с получением ультрадисперсного фторопласта и перфторпарафинов // *Вятский государственный университет (ФГБОУ ВПО «ВятГУ»).* – RU 2528054.
33. *Арсеньев С.Л., Лозовицкий И.Б., Сирик Ю.П., Тураев В.В., Однорал М.В., Данилов Е.А.* Техническое предложение: Технология и оборудование диспергирования вторичного политетрафторэтилена. – Павлоград, 2004. – УДК: 678.743.41/45:678.06 621.921:620.178.16.
34. *Дубинская А.М.* Превращения органических веществ под действием механических напряжений // *Успехи химии.* – 1999. – 68 (8). – С. 708–724.
35. *Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П.* О квалиметрии. – М. Изд. стандартов, 1973. – 220 с.
36. *Алексеев В.П., Азаров А.И., Дроздов А.Ф., Кротов П.Е.* Новая вихревая техника для средств охраны труда // *Вихревой эффект и его применение в технике: Материалы 4-й Всесоюзной научно-технической конференции.* – Куйбышев: КуАИ, 1984. – С. 104–111.
37. *Бабакин Б.С., Выгодин В.А.* Бытовые холодильники и морозильники: Справочник. – М.: Колос, 2000. – С. 455–456.
38. *Бирюк В.В.* Вихревой эффект энергетического разделения газов в авиационной технике и технологии // *Изв. Вузов. Авиационная техника.* – 1993, № 2. – С. 20–23.
39. *Кирюхин Д.П., Ким И.П., Бузник В.М., Игнатьева Л.Н., Курявый В.Г., Сахаров С.Г.* Радиационно-химический синтез теломеров тетрафторэтилена и их использование для создания тонких защитных фторполимерных покрытий // *Рос. хим. журнал. (журнал Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева).* – 2008. – Т. LII, № 3.
40. *Gryaznov I., Gryaznov S., Gryaznov A., Figovsky O.* Method and apparatus for manufacturing submicron polymer powder // Патент 12/981,202 от 29.12.2010.

<b>Контакты</b>	<b>Фиговский Олег Львович</b> figovsky@gmail.com
-----------------	---

