

УДК 621.594

## Изменение объема парной полости в процессе расширения в винтовом детандере

Канд. техн. наук М. М. ДАНИЛОВ<sup>1</sup>, З. Н. ИВАНОВА<sup>2</sup><sup>1</sup>dmm@trumgame.ru, <sup>2</sup>yaozavi@mail.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

*Параметры работы винтовых детандеров сопоставимы с аналогичными параметрами низкотемпературных турбодетандеров, которые используются в схеме газовой холодильной машины для вымораживания диоксида углерода в расширяющемся потоке рабочего вещества. Для оценки эффективности использования винтового детандера, работающего в режиме вымораживания, необходимо подробно изучить процесс понижения давления в парной полости. Эти знания необходимы для того, чтобы использовать существующую математическую модель для вымораживания диоксида углерода в объеме потока газовой смеси при ее течении через расширительное устройство с известным значением распределения давления и скорости потока. В данной статье предложен метод определения скорости расширения рабочего вещества в парной полости. Для этого предложены алгоритмы построения диаграмм сокращения заполненного объема ведущего и ведомого винтов, диаграммы изменения свободного объема парной полости от угла поворота ведущего винта. Представлены примеры построения вышеперечисленных диаграмм для винтов диаметром 315 мм, имеющим относительную длину, равную 0,9, что обусловлено их оптимальными скоростными характеристиками. Определенный по диаграмме угол расширения дает возможность получить скорость и время процесса расширения, что является исходными данными, позволяющими осуществить расчет процесса кристаллизации.*

**Ключевые слова:** диоксид углерода, газовая холодильная машина, винтовой детандер, заполненный объем, парная полость, скорость расширения, время расширения, угол поворота ведущего / ведомого винтов.

### Информация о статье

Поступила в редакцию 15.04.2016, принята к печати 24.10.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-4-58-62

### Ссылка для цитирования

Данилов М. М., Иванова З. Н. Изменение объема парной полости в процессе расширения в винтовом детандере // Вестник Международной академии холода. 2016. № 4. С. 58–62.

## Changing steam chamber volume in screw expander

Ph. D. M. M. DANILOV<sup>1</sup>, Z. N. IVANOVA<sup>2</sup><sup>1</sup>dmm@trumgame.ru, <sup>2</sup>yaozavi@mail.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

*Operating parameters of screw expanders are comparable with the parameters of low-temperature turbo expanders which are used in the gas refrigeration unit for freezing carbon dioxide in the expanding flow of working medium. For the efficiency estimation of using screw expander in the freezing carbon dioxide mod we need to study in detail the process of decompression in the steam chamber. This knowledge is important for the opportunity of using current mathematical model for carbon dioxide freezing from the volume of expanding flow passing through expander with known value of the pressure distribution and flow speed. In this article is presented method of working medium expansion rate definition in the steam chamber. To achieve it are represented algorithms of creating diagrams of reduction male and female rotors swept volume and diagram of changing steam chamber free volume depending on the male rotor angle of rotation. Also in this article are shown the examples of creating above diagrams for the rotor with diameter 315 mm and ratio the length to diameter 0.9. Calculated by using the diagrams expansion angle gives us the opportunity to calculate velocity and time of expansion. These two parameters are the initial values for the carbon dioxide crystallization process estimation.*

**Keywords:** carbon dioxide, gas refrigeration unit, screw expander, swept volume, steam chamber, expansion velocity, expansion time, rotation angle of the male / female rotor.

Винтовые детандеры, в отличие от винтовых компрессоров, в настоящее время мало изучены и применяются лишь в некоторых областях промышленности. В част-

ности, их используют для производства собственной дешевой электроэнергии в целях энергосбережения и энергоэффективности на промышленных и отопительных

котельных (на производстве, в городе, в селе, дома). Подобные установки были разработаны и успешно производятся компанией «Эко-Энергетика» [1]. Паровая винтовая машина ПВМ (детандер) является новым типом парового двигателя. В диапазоне мощности 150–1500 кВт винтовая машина практически по всем показателям существенно превосходит лопаточные турбины и поршневые детандеры. Приведенные объемные и энергетические показатели работы ПВМ имеют достаточно высокие значения [2].

В секторе холодильной промышленности данный тип расширительных машин не нашел пока применения, хотя они имеют высокий потенциал и ряд преимуществ над существующими осевыми и центробежными детандерами, используемыми в новом способе получения сухого льда в цикле регенеративной газовой холодильной машины [3, 4].

Обзор теоретических и экспериментальных исследований [5–8] показал, что параметры работы турбодетандеров и винтовых детандеров соизмеримы. Таким образом, актуальной является задача исследования винтового детандера для нового способа получения твердого диоксида углерода. Для количественной оценки эффективности использования винтового детандера необходимо произвести расчет процесса кристаллизации диоксида углерода. Расчет этого процесса можно осуществить, используя математическую модель для выморачивания твердого диоксида углерода в объеме потока газовой смеси при ее течении через расширительное устройство с известным распределением давления и скорости потока [9]. В случае использования винтового детандера необходимо определить скорость расширения, для расчета которой требуется вычислить угол расширения  $\varphi_{расш}$  (угол поворота ведущего винта до отсечения парной полости от входного окна).

По аналогии с углом сжатия для винтового компрессора, угол расширения может быть вычислен по диаграмме изменения объема парной полости от угла поворота ведущего винта [10].

Ниже представлен алгоритм расчета для построения диаграммы изменения объема парной полости винтового детандера.

Проводится определение параметров для построения диаграммы сокращения заполненного объема ведущего (имеющего меньшее число заходов) винта. По аналогии с винтовым компрессором определяются: полный объем парной полости  $W_0$ , полезный объем парной полости  $W_n$ , центральные углы  $\beta_{01}$  и  $\beta_{02}$ , угол поворота ведущего винта от начала увеличения объема парной полости до полного замыкания линии контакта  $\varphi_{1n}$ . Затем строится диаграмма сокращения заполненного объема ведущего винта от точки  $D$  до точки  $A$  (рис. 1),

Заполненный объем в точке  $D$

$$W_{13(D)} = 0.$$

Заполненный объем в точке  $C$

$$W_{13(C)} = \frac{h_1}{360} f_{1n} \frac{\varphi_{1n}}{2},$$

где  $h_1$  — ход винтовой линии ведущего винта;  $f_{1n}$  — площадь впадин ведущего винта.

Заполненный объем в точке  $B$

$$W_{13(B)} = W_{13(C)} + \frac{h_1}{360} f_{1n} (\tau_{13} - \varphi_{1n}),$$

где  $\tau_{13}$  — угол закрутки ведущего винта.

Заполненный объем в точке  $A$

$$W_{13(A)} = W_{13(B)} + W_{13(C)}.$$

Текущий объем на участке  $D-C$  вычисляется по формуле:

$$W_{13(X)} = \frac{h_1}{360} f_{1n} \frac{\varphi_{1x}^2}{2\varphi_{1n}},$$

где  $\varphi_{1x}$  — текущее значение угла поворота на участке.

Текущий объем на участке  $A-B$  вычисляется по формуле:

$$W_{13(X)} = W_{13(D)} - \frac{h_1}{360} f_{1n} \frac{[(\tau_{13} + \varphi_{1n}) - \varphi_{1x}]^2}{2\varphi_{1n}},$$

Изменение объема парной полости на участке  $B-C$  носит линейный характер, так как длина линии контакта винтов остается постоянной.

На рис. 1 показана диаграмма сокращения заполненного объема парной полости для ведущего винта диаметром  $D = 315$  мм, имеющим относительную длину винта  $k_f = 0,9$ .

Для построения диаграммы сокращения заполненного объема для ведомого винта определяются: угол поворота ведомого винта от начала увеличения объема парной полости до полного замыкания линии контакта  $\varphi_{2n}$ , величина этого же угла, приведенного к углу поворота ведущего винта  $\varphi_{2n,1}$ , центральный угол ведомого винта, приведенный к углу поворота ведущего винта  $2\gamma_{23,1}$ . Далее строится диаграмма по точкам, указанным на рис. 2.

Заполненный объем в точке  $D$  и  $D'$  равен 0.

Заполненный объем в точке  $C$

$$W_{23(C)} = \frac{h_1}{360} f_{2n} \frac{\varphi_{2n,1}}{2},$$

где  $f_{2n}$  — площадь впадин ведомого винта.

Заполненный объем в точке  $B'$

$$W_{23(B')} = W_{23(C)} + \frac{h_1}{360} f_{2n} (\tau_{13} - \varphi_{2n,1}).$$

Заполненный объем в точке  $A$

$$W_{23(A)} = W_{23(B')} + W_{23(C)}.$$

Текущий объем на участке  $D'-C$

$$W_{23(X)} = \frac{h_1}{360} f_{2n} \frac{[\varphi_{1x} - 2\gamma_{23,1}]^2}{2\varphi_{2n,1}}.$$

Текущий объем на участке  $B'-A$

$$W_{23(X)} = W_{23(D)} - \frac{h_1}{360} f_{2n} \frac{[(\tau_{13} + \varphi_{1n}) - \varphi_{1x}]^2}{2\varphi_{2n,1}}.$$

Изменение объема парной полости на участке  $B'-C$  носит линейный характер, так как длина линии контакта винтов остается постоянной.

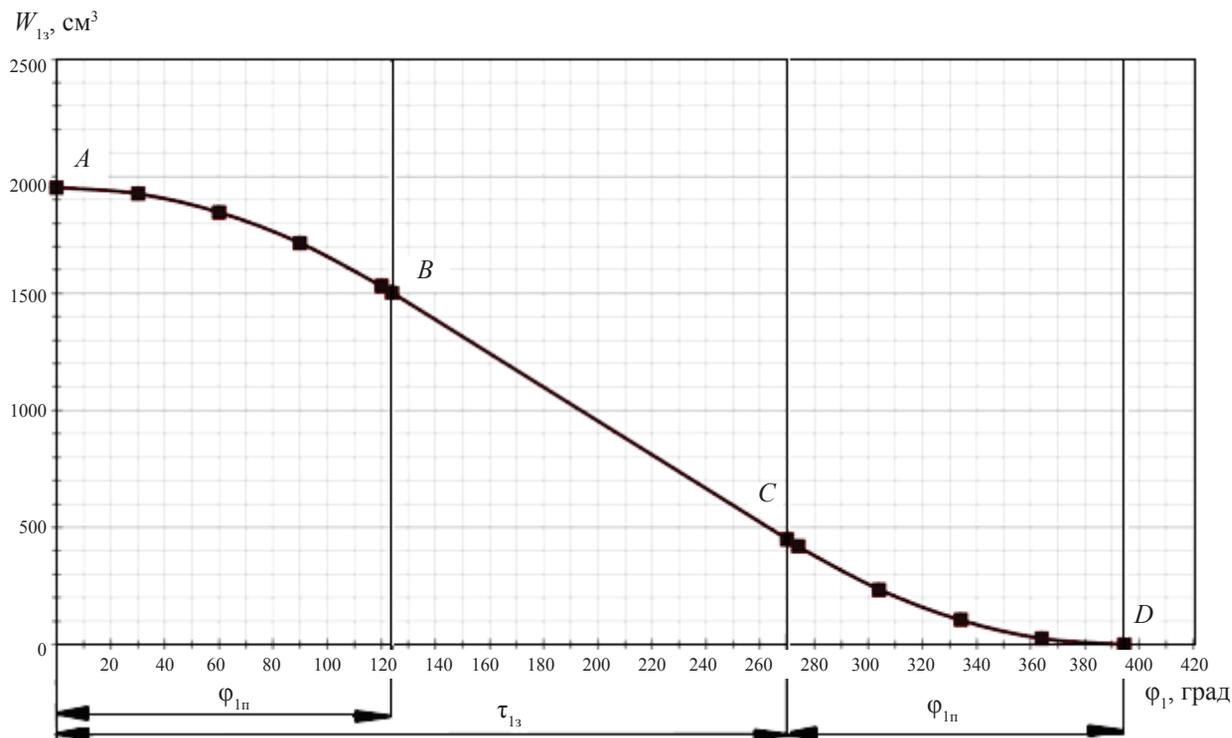


Рис. 1. Диаграмма сокращения заполненного объема ведущего винта диаметром  $D = 315$  мм,  $k_1 = 0,9$

На рис. 2 представлена диаграмма сокращения заполненного объема парной полости для ведомого винта диаметром  $D = 315$  мм, имеющим относительную длину винта  $k_1 = 0,9$ .

Для построения диаграммы изменения свободного объема парной полости от угла поворота ведущего винта, представленной на рис. 3, суммируются данные из диаграмм на рис. 1 и 2 по точкам  $A, B', B, C, D', D$  через угол  $\Delta\phi$ , а затем определяются значения объема парной полости по уравнению

$$W_{п.п} = W_0 - (W_{1п} - W_{23}).$$

Полученная диаграмма изменения свободного объема парной полости от угла поворота ведущего винта (рис. 3), позволяет определить скорость расширения  $c_{расш}$  для различных степеней понижения давления  $\pi_p$ . Для этого сначала определяется начальный объем парной полости согласно формуле

$$W_{нач} = \frac{W_{п.п}}{\pi_p^{1/n}},$$

где  $n$  — показатель политропы расширения.

Определенное значение начального объема откладывается по шкале ординат диаграммы на рис. 3. Далее проводится прямая до пересечения с построенной линией на диаграмме, что дает возможность определить соответствующий угол  $\phi_{1расш}$ , т.е. угол поворота ведущего винта, при котором парная полость отсекается от входного окна.

Изменение угла поворота ведущего винта, при котором происходит процесс расширения

$$\Delta\phi = \phi_{1расш} - \phi_{1м},$$

где  $\phi_{1м}$  — угол поворота ведущего винта, при котором парная полость соединяется с выходным окном.

Точка  $M$  должна соответствовать углу поворота винта  $0,5(\tau_{13} - \tau_{13.пред})$ , откладываемому от точки  $A$ .

Изменение угла поворота преобразуется в линейную величину

$$\Delta z = \Delta\phi_{расш} = \frac{\Delta\phi \cdot h_1}{2\pi}.$$

Скорость расширения

$$c_{расш} = \frac{\Delta z}{\tau}.$$

Время расширения

$$\tau = \frac{\Delta W}{V_T},$$

где  $V_T$  — теоретическая объемная производительность винтового детандера.

Данный алгоритм построения диаграммы изменения свободного объема парной полости от угла поворота ведущего винта является отправной точкой для дальнейшего расчета процесса кристаллизации диоксида углерода в цикле регенеративной газовой холодильной машины, используемой в новом способе получения сухого льда. Расчет процесса кристаллизации позволяет определить эффективность применения винтового детандера для получения сухого льда.

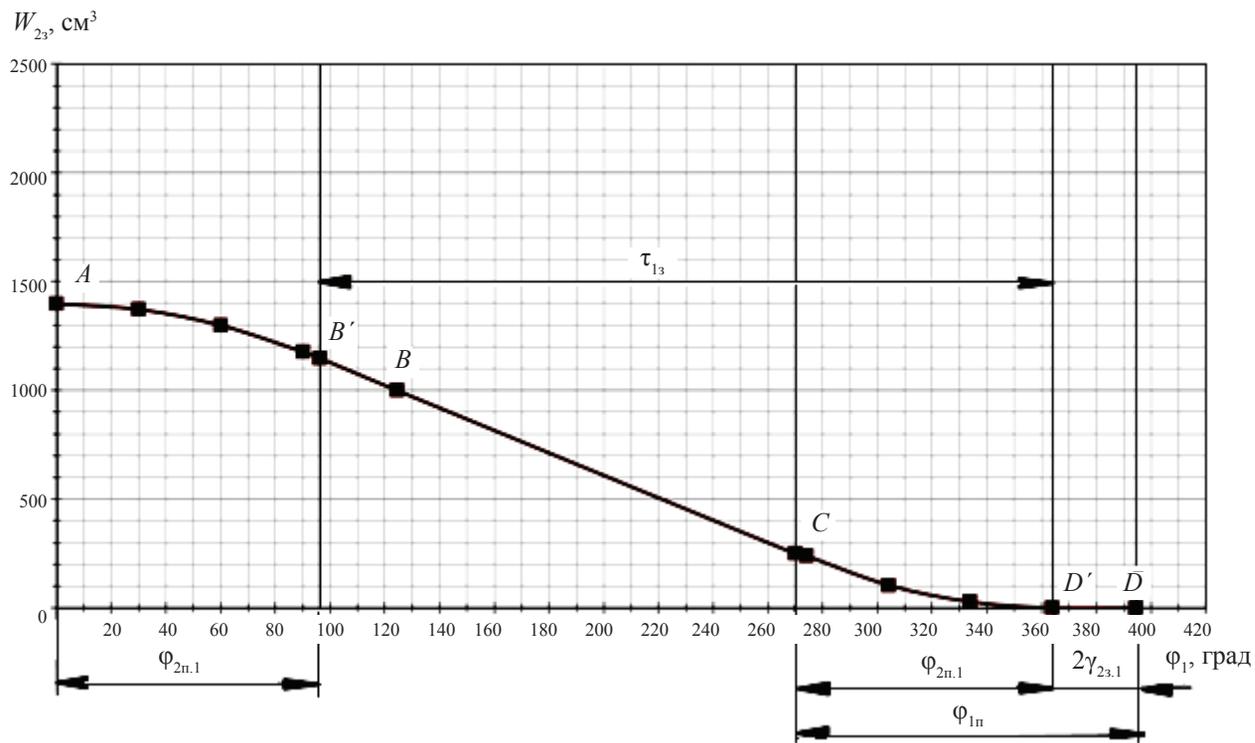


Рис. 2. Диаграмма сокращения заполненного объема ведомого винта диаметром  $D = 315$  мм,  $k_f = 0,9$

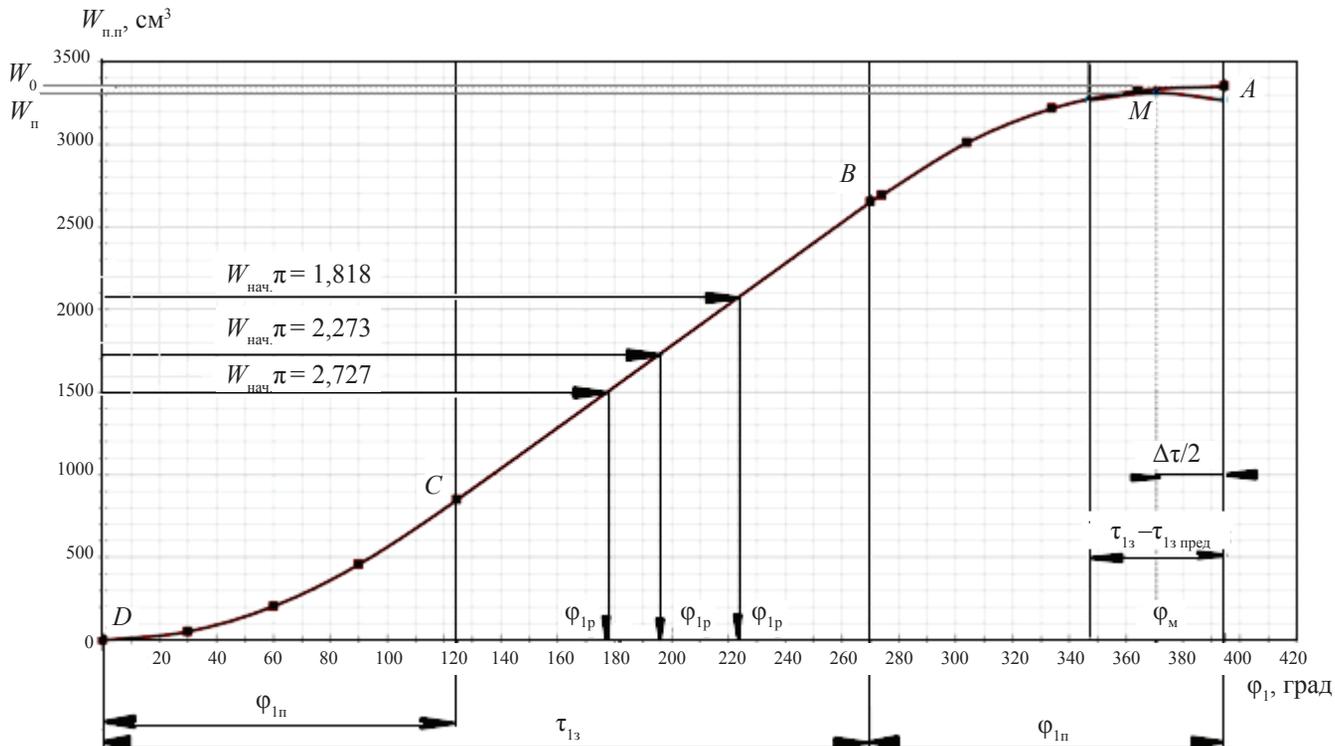


Рис. 3. Диаграмма изменения свободного объема парной полости от угла поворота ведущего винта диаметром  $D = 315$  мм,  $k_f = 0,9$

## Литература

## References

1. Березин С. Р., Боровков В. М., Ведаико В. И. Паровая винтовая машина как средство энергосбережения // Новости теплоснабжения, 2009. № 7 (107).
2. Березин С. Р., Носков А. Н., Щеглов Г. А. Определение показателей рабочего процесса паровой винтовой машины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016, № 1. С. 50–56.
3. Данилов М. М. Особенности процесса получения твердого диоксида углерода в низкотемпературных турбодетандерах: дис. канд. техн. наук. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2003. 143 с.
4. Данилов М. М., Смирнов А. С. Основные особенности образования твердой фазы диоксида углерода // Вестник Международной академии холода. 2014. № 2. С. 37–40.
5. Данилов М. М., Иванова З. Н. Теоретические и экспериментальные исследования винтовых детандеров // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование», 2015. № 1. С. 13–17.
6. Зарницкий Г. Э., Репин Л. А. Некоторые результаты экспериментального исследования работы винтового детандера на природном газе. // Газовое дело, 1972, № 9. С. 18–21.
7. Sung-Wei Hsu., Hsiao-Wei D. Chiang., Chih-Wei Yen Experimental Investigation of the Performance of a Hermetic Screw-Expander Organic Rankine Cycle // Energies, 2014, No 7.
8. Куприянов А. Н. Разработка и повышение эффективности винтового детандера для систем низкотемпературной сепарации попутного нефтяного газа: автореферат дис. канд. техн. наук. — М., 1988. 6–15 с.
9. Данилов М. М. Моделирование процесса вымораживания диоксида углерода в объеме расширяющегося газового потока // Известия СПбГУНиПТ. 2007. № 1. С. 6–8.
10. Носков А. Н. Силы и моменты в винтовом компрессоре. — СПб.: Университет ИТМО, 2015. 37 с.
1. Berezin S. R., Borovkov V. M., Vedaiko V. I. Vapour screw unit as an energy saving way. *Novosti teplosnabzheniya*. 2009. No 7 (107). (in Russian)
2. Berezin S. R., Noskov A. N., Scheglov G. A. Definition of indicators of the steam screw machine working process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*. 2016. No. 1. P. 50–56 (in Russian)
3. Danilov M. M. Features of the carbon dioxide obtaining in the low-temperature turbines: dissertation PhD, Saint-Petersburg 2013. 7–9 p. (in Russian)
4. Danilov M. M., Smirnov A. S. The main features of the solid carbon dioxide formation. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2014. No 2. p. 37–40. (in Russian)
5. Danilov M. M., Ivanova Z. N. Theoretical and experimental screw expanders investigations. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie»*, 2015. No 1. p. 13–17. (in Russian)
6. Zarnitskiy G. E., Repin L. A. Some results of the natural gas screw expander's experimental study. *Gazovoe delo*, 1972, No 9. P. 18–21. (in Russian)
7. Sung-Wei Hsu., Hsiao-Wei D. Chiang., Chih-Wei Yen. Experimental Investigation of the Performance of a Hermetic Screw-Expander Organic Rankine Cycle. *Energies*, 2014, No 7.
8. Kyprianov A. N. Developing and improving screw expander's efficiency for the low-temperature separation of petroleum gas, PhD synopsis. Moscow. 1988. (in Russian)
9. Danilov M. M. Simulation process of freezing carbon dioxide in the gas stream expanding volume. *Izvestiya SPBGUNiPT*. 2007. No 1. p. 6–8. (in Russian)
10. Noskov A. N. Forces and moments in the screw compressor. S-Petersburg, ITMO Univercity, 2015. 37 p. (in Russian)



<http://agro-week.ru/>

**Тематические разделы:**

- Сельхозтехника. Запчасти. Комплекующие
- Растениеводство
- Животноводство и птицеводство
- Переработка сельскохозяйственных отходов, энергосбережение. Услуги для АПК

3-я Северо-Западная специализированная выставка техники, технологий, оборудования и услуг для агропромышленного комплекса

**АгроТехЭкспо 2017**

**14-16 марта 2017 г.**

**Место проведения:**

КВЦ «Экспофорум»

Санкт-Петербург, Петербургское шоссе, 64/1

**Организатор:**

Выставочное объединение «РЕСТЭК®»

Тел.: +7 (812) 320 6363

Факс: +7 (812) 320 8090

E-mail: main@restec.ru