

# ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 621.455

DOI 10.26897/1728-7936-2017-6-72-77

**АНДРЕЕВ СЕРГЕЙ АНДРЕЕВИЧ**, канд. техн. наук, доцент

E-mail: asa-finance@yandex.ru

**ЗАГИНАЙЛОВ ВЛАДИМИР ИЛЬИЧ**, докт. техн. наук, профессор

E-mail: energo-viz@mail.ru

**ВОРОБЬЕВ ВИКТОР АНДРЕЕВИЧ**, докт. техн. наук, профессор

E-mail: tatiana49@mail.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550,  
ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИОННОГО ВЕТРА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ АПК

Теоретически изучен эффект ионного ветра, произведена оценка возможности его практического использования в технологических процессах АПК. В ряде случаев традиционные электромеханические вентиляторы могут быть заменены на электростатические устройства, образующие поступательное движение газов (ионный ветер) за счет воздействия электрического поля на предварительно ионизированные частицы. Ионные движители содержат ионизатор, фокусирующий, ускоряющий, замедляющий и осаждающий электроды, а также нейтрализатор. Указаны специфические возможности ионных движителей: создавать равномерный поток воздуха; перемещать воздух при небольших давлениях (0,50...0,75 мм водяного столба); практически безынерционно изменять направление движения воздушного потока; применять для искусственного увлажнения среды и для измельчения частиц жидкости в системах с острыми и капиллярными электродами. Эффективность устройств существенно зависит от затрат энергии на ионизацию молекул газа. Рассчитано: для ионизации 1 м<sup>3</sup> воздуха необходимо затратить 198 кВт·ч, что соизмеримо с энергозатратами на перемещение 1 м<sup>3</sup> воздуха традиционным электровентилятором. Указано, что для достижения коэффициента преобразования энергии порядка 15% подвижность ионов должна составлять 10<sup>-6</sup> м<sup>2</sup>/В. Поэтому использование ионного ветра перспективно с газами при повышенной температуре или с большим содержанием взвешенных частиц. Так, искусственный воздухообмен в овощехранилищах; подача воздуха, кислорода или озона, а также других газообразных окислителей в топочные камеры котлов не требуют больших производительностей или высоких напоров. Изменяя пространственное расположение электродов, а также величину и алгоритм подачи напряжения, можно формировать движение воздуха практически по любой траектории. Такой способ воздухообмена позволит существенно повысить санитарно-гигиенические показатели процесса и снизить энергозатраты.

**Ключевые слова:** вентиляторы, воздух, ионизация, электрическое поле, движение заряженных частиц.

**Введение.** Многие технологические процессы современного АПК требуют применения движущихся газовых потоков. К таким процессам, например, относятся: вентиляция помещений, сушка зерна, перемещение воздуха в емкостях для хранения продуктов, подача газообразных топлив и окислителей в зону сжигания, подача мелкодисперсных водных растворов к охлаждаемым объектам и др. Для обеспечения поступательного движения воздуха в большинстве случаев используют электромеханические вентиляторы. Сегодня промышленность выпускает вентиляторы самых различных кон-

струкций, характеризующиеся широким спектром эксплуатационных параметров [1, 2]. В то же время не подлежит сомнению, что электромеханическим вентиляторам присущ ряд недостатков, полное устранение которых едва ли возможно.

Например, работа электромеханических вентиляторов сопровождается акустическими и вибрационными помехами. Эти помехи можно снизить (что способно сказаться на экономических показателях), но полностью исключить нельзя. Любой электродвигатель традиционного вентилятора содержит, как минимум, два подшипника, требующих периодиче-

ского обслуживания и имеющих ограниченный срок службы. На изготовление обмоток электродвигателя расходуется цветной металл. Наконец, эксплуатация механических вентиляторов всегда небезопасна, из-за чего их лопасти обычно размещают в специальных кожухах или внутри воздухопроводов.

В 70-80-е гг. минувшего века учеными Японии, СССР и США практически одновременно были проведены исследования по перемещению в электрическом поле предварительно ионизированных газов. Было установлено, что ионизированные частицы газа можно побудить к поступательному движению, воздействуя на них внешним электрическим полем. А сам поток заряженных частиц газа стали называть ионным ветром [3]. Практического применения ионный ветер в то время не нашел. Было установлено, что затраты энергии на ионизацию сухого воздуха при комнатной температуре весьма ощутимы, а поэтому ионные вентиляторы (ионные движители) не могут конкурировать с традиционными электромеханическими конструкциями по экономическим показателям.

Вместе с тем возросшие требования к комфортным условиям пребывания людей, а также прогресс в освоении новых материалов дают основание предположить, что для ряда технологических процессов использование ионного ветра представляет целесообразным.

**Цель исследования** – теоретическое изучение эффекта ионного ветра с современных позиций, а также оценка возможности его практического использования в технологических процессах АПК.

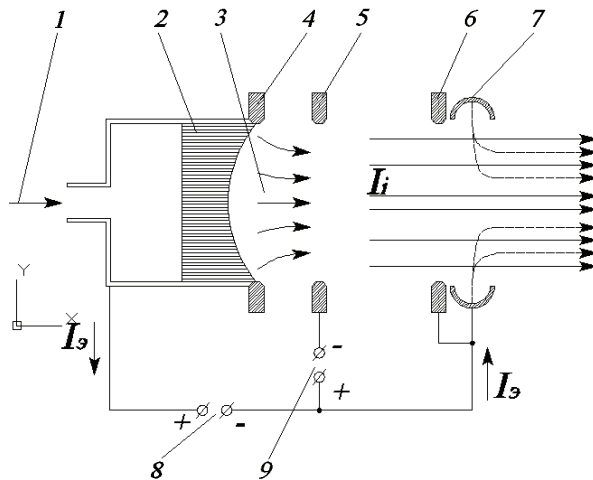
**Материал и методы.** Материалом исследований явились устройства для ионизации газов с последующим разделением заряженных частиц электрическим полем. В исследованиях применялся теоретический метод познания процесса, заключающийся в отражении явлений и происходящих внутренних связей и закономерностей, достигаемых обработкой данных, полученных эмпирическим путем.

**Результаты и обсуждение.** Рассмотрим работу устройства (ионного движителя) для создания ионного ветра [4] по его принципиальной схеме, представленной на рисунке.

Исходное газообразное рабочее тело (любой газ или смесь газов) 1 поступает в ионизатор 2. Здесь оно ионизируется, т.е. составляющие его атомы разделяются на электроны и ионы. Далее поток ионов 3 формируется в относительно узкий и насыщенный пучок с помощью фокусирующего электрода 4. Благодаря этому удается минимизировать попадание отдельных ионов на ускоряющий электрод 5. Потенциалы фокусирующего электрода и ионизатора положительны. Величина разности потенциалов между ускоряющим электродом и ионизатором должна обеспечивать разгон ионов. Ускорение движения ионов способствует увеличению плотности потока, которая на каждый квадратный сантиметр может составлять несколько миллиампер.

Далее на пути движения потока расположен замедляющий электрод 6. Если считать, что замедляю-

щий электрод имеет нулевой потенциал, то потенциал ускоряющего электрода окажется отрицательным. На участке между ускоряющим и замедляющим электродами скорость ионов снижается. При этом средний свободный пробег частиц должен значительно превышать расстояние между электродами. Это минимизирует вероятность соударения ионов с атомами рабочего тела, их ионизацию и вторичное попадание на элементы ускорителя.



**Принципиальная схема ионного электростатического движителя**

По соединительным проводам электроны от ионизатора подводятся к нейтрализатору 7. Далее электроны попадают в струю ионов и нейтрализуют ее. Потенциал замедляющего электрода почти не отличается от потенциала нейтрализатора. Электроны, выходящие из ионизатора, на ускоряющий электрод и ионизатор не попадают, так как этому препятствует разность потенциалов, создаваемая источником энергии 8. В основном энергия источника 8 расходуется на разгон ионов между ионизатором и ускоряющим электродом, а его мощность оказывается незначительной. В идеальном случае, когда ионы не достигают ускоряющего электрода, расходуемая мощность равна нулю.

Итак, ионы рабочего тела (в качестве которого может быть практически любой газ или смесь газов) приобретают поступательное движение. На место переместившихся частиц поступают другие частицы из окружающей среды, а сам электростатический движитель выполняет функцию своеобразного насоса. Правда, образующийся напор при этом невелик, но исключительно равномерен и зависит только от потенциала ионизации рабочего тела и наличия в нем относительно крупных частиц воды или других включений.

Таким образом, первоочередное использование ионного ветра можно ожидать в технологических процессах, не требующих больших производительностей или высоких напоров. К таким процессам можно отнести искусственный воздухообмен в ово-

шехранилищах, подачу воздуха, кислорода или озона, а также других газообразных окислителей в топочные камеры котлов [5, 6] и др. Особый интерес представляют процессы, в которых ионизации необходимо подвергать воздух при повышенной температуре, а также воздух с большим содержанием взвешенных частиц или водяных микрокапель. В этих случаях потенциал ионизации (а соответственно и необходимая энергия для ионизации) таких частиц оказывается значительно ниже [7].

И все же чистый атмосферный воздух также может рассматриваться как объект ионизации и последующего использования в виде потока. Об этом свидетельствуют результаты исследований: преобразование кинетической энергии движущихся газовых потоков в электрическую энергию [8-10]. В этих исследованиях движущийся газовый поток сначала ионизировался, а затем пропусклся через систему электродов, включенных во внешнюю цепь.

При анализе процесса образования и переноса заряженных частиц между электродами было составлено выражение для оценки электрической мощности:

$$P_{эл} = qNF \frac{dV}{S},$$

где  $q$  – заряд, К;  $N$  – количество заряженных частиц, создаваемых в единице объема на единице площади электрода;  $F$  – поверхность ионообразующего электрода, м<sup>2</sup>;  $d$  – расстояние между электродами, м;  $V$  – скорость ветра, м/с;  $S$  – подвижность ионов в воздухе.

С другой стороны, мощность ветрового потока, приходящегося на ионизирующий электрод, составляет величину

$$P_{в} = \frac{1}{2} \rho V^2 F,$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

В результате несложных преобразований было получено выражение, определяющее своеобразный КПД и пригодное для оценки эффективности таких преобразователей:

$$\eta = \frac{0,02\varepsilon}{S^2 R},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость воздуха, Ф/м.

При подстановке в последнее выражение численных значений параметров чистого атмосферного воздуха ( $\varepsilon = 0,027\pi 10^{-9}$  Ф/м и  $\rho = 1,293$  кг/м<sup>3</sup>) было получено

$$\eta = \frac{1,36 \cdot 10^{-23}}{S^2}.$$

По результатам теоретических исследований был сделан вывод о том, что эффективность преобразователей кинетической энергии ветра в электрическую энергию сильно зависит от подвижности ионов. При стремлении подвижности ионизированных частиц  $S$  к нулю коэффициент преобразования

возрастает до бесконечности. Объяснить это явление можно предположением, что с уменьшением подвижности ионов трение между ними и окружающим воздухом возрастает. Вследствие этого условия переноса ионов улучшаются, и эффективность процесса возрастает. Для достижения коэффициента преобразования энергии, соизмеримого с аналогичным показателем традиционных ветродвигателей (например, 15%), подвижность ионов должна составлять величину порядка  $10^{-6}$  м<sup>2</sup>/В, что вполне реально.

Очевидно, что при разработке ионных двигателей газов необходимо стремиться к минимальным энергетическим затратам. Поэтому целью исследований является создание таких конфигураций ионизаторов, параметров поля и характера движения частиц, которые определяли бы минимальные затраты энергии на ионизацию и перемещение газа. Известно, что для движения частиц в электрическом поле необходимо, чтобы заряженными оказались хотя бы 0,03...1,00% от их общего количества. Для ионизации одной молекулы воздуха ей необходимо сообщить энергию в объеме 3,3 эВ. В 1 м<sup>3</sup> воздуха содержится  $2,7 \cdot 10^{25}$  молекул, следовательно, для ионизации всех молекул необходимо затратить  $89,1 \cdot 10^{25}$  эВ. Учитывая, что 1 кВт·ч =  $2,25 \cdot 10^{22}$  эВ (или 1 эВ =  $4,45 \cdot 10^{-26}$  кВт·ч), общие энергозатраты составят  $E = 39,6$  кВт·ч. Принимая во внимание, что ионизировать необходимо 0,5% общего количества молекул, получим энергозатраты порядка 0,198 кВт·ч (198 Вт·ч). Это значение оказывается вполне приемлемым и соизмеримым с величиной энергозатрат, необходимых на перемещение 1 м<sup>3</sup> воздуха традиционным электровентилятором.

Рассмотрим некоторые специфические особенности ионных двигателей, оказывающих влияние на их практическое применение.

Во-первых, поток воздуха, создаваемый ионным двигателем, является равномерным. При разработке электромеханической вентиляции конструкторы редко учитывают переменный характер движения потока, считая его постоянным во времени. На самом деле созданный воздушный поток пульсирует соразмерно с частотой вращения лопастей. При попадании переменного потока на открытые участки тела (например, на лицо) возникают неприятные ощущения. Длительное воздействие пульсирующего потока может спровоцировать болезни. Кроме того, воздушный поток от механического вентилятора распространяется неравномерно и в пространстве. Периферийные области потока движутся турбулентно и интенсивно, а в центре потока, являющегося продолжением горизонтальной оси вентилятора, скорость воздуха практически равна нулю. В ионном двигателе достигается абсолютно равномерное движение, что определяет возможность его успешного использования в электростатических фильтрах. Любопытно, что даже на некотором расстоянии от ионного двигателя газ перемещается по начальной траектории. Это свойство открывает возможность создания электронагревательных приборов с ионными двигателями, обеспечивающих избирательный нагрев требуемых точек пространства.

Во-вторых, ионные движители позволяют перемещать воздух при небольших давлениях (0,50...0,75 мм водяного столба). Этим они существенно отличаются от механических вентиляторов. Если потребуются относительно большие давления воздуха, можно использовать каскадное (последовательное) включение движителей. В этом случае выход одного движителя соединяется со входом другого.

В-третьих, напряжение на межэлектродном промежутке разрядника должно быть связано с состоянием ионизируемого воздуха: степенью его предварительной ионизации, давлением, влажностью, температурой и пр. При этом одним из наиболее существенных факторов является давление, так как оно влияет на вероятность возникновения пробоя. Здесь уместно вспомнить закон Пашена, согласно которому снижение атмосферного давления уменьшает пробойное напряжение:

$$U = \frac{a(Pd)}{\ln(Pd) + b},$$

где  $U$  – напряжение пробоя, В;  $P$  – давление, атм;  $d$  – расстояние между плоскими электродами, м;  $a$  и  $b$  – постоянные для атмосферного воздуха,  $a = 43,6 \cdot 10^6$ ,  $b = 12,8$ .

В-четвертых, с помощью ионных движителей можно практически безынерционно изменять направление движения воздушного потока. Добиться такого эффекта с помощью механических вентиляторов принципиально невозможно, так как их элементы обладают моментами инерции. По этой же причине нельзя мгновенно изменить частоту вращения лопастей механического вентилятора, чтобы быстро изменить параметры потока. Таким образом, ионные движители открывают возможность реверсирования потока, изменения интенсивности и направления движения, а также создания эффекта вращения. Выбор соответствующего режима достигается за счет изменения пространственного расположения электродов, а также алгоритмом подачи энергии питания. Инерционность определяется только массой движущихся частиц, при этом она настолько незначительна, что на практике ею можно пренебречь.

В-пятых, ионный движитель может найти применение для искусственного увлажнения среды. Для этого в его конструкцию должен быть введен испарительный элемент, который частично погружен в воду. Вместо механического вентилятора, используемого в традиционных увлажнителях, ионный увлажнитель должен содержать коронирующий и осаждающий электроды, размещенные непосредственно перед испарительным элементом. При подаче напряжения на электроды возникает определенное давление воздуха, которого вполне достаточно для прохождения сухого воздуха через влажный испарительный элемент.

В-шестых, ионные движители могут применяться для измельчения частиц жидкости в системах с острыми и капиллярными электродами. При работе таких систем вода или другая жидкость получает

электрический заряд, находясь в жидкой фазе. В то же время захват ионов происходит в газообразном состоянии. При этом водяные микрокапли (диаметром около 10 мкм) срываются с одного из электродов, а размеры этих микрокапель в межэлектродном пространстве уменьшаются. Одновременно сокращается максимальная величина электрического заряда, который может быть удержан такой микрокаплей. Микрокапля не может сохранить приобретенный заряд и разрывается на более мелкие частицы.

Одно из объяснений эффекта электрораспыления может быть дано, исходя из предположения о положительном потенциале капиллярного электрода. Эмиттер (полая игла с жидкостью) размещен на расстоянии  $d$  от заземленного (осадительного) электрода. Под влиянием поверхностного натяжения капля принимает форму полусферы, при которой ее поверхность минимальна. В результате приложения электрического напряжения  $U_0$  на поверхности капли возникает электрическое поле напряженностью  $E$ :

$$E = 2U_0 \left[ r \cdot \ln \left( \frac{4d}{r} \right) \right],$$

где  $r$  – радиус полусферы.

Если приложенное напряжение невелико, возникает новое равновесие, при котором радиус полусферы капли жидкости уменьшается из-за явления поляризации, а также вследствие миграции положительных и отрицательных зарядов. При значительном повышении напряжения появляется конус Тейлора. Условиями возникновения конуса Тейлора являются эквипотенциальность поверхности жидкости и устойчивость ее формы.

Разрыв частицы жидкости происходит в том случае, если гидродинамическое время релаксации становится больше продолжительности релаксации электрического заряда. Заряженные частицы начинают дробиться на мелкие капли, которые удаляются от капиллярного электрода под действием электростатической силы. Эти мелкие капли смещаются к противоположно заряженному электроду, где впоследствии оседают.

Измельчение частиц жидкости до мелко- и сверхмелкодисперсного состояния может найти применение в устройствах подачи аэрозолей, а также в оборудовании, обеспечивающем благоприятные условия для сжигания топлива посредством распыла топлива или жидкого окислителя.

Изменяя пространственное расположение электродов, а также величину и алгоритм подачи напряжения, можно формировать движение воздуха практически по любой траектории. Это открывает возможность применения явления ионного ветра для избирательной вентиляции объектов. Такой способ воздухообмена позволит существенно повысить санитарно-гигиенические показатели процесса и снизить энергозатраты.

Весьма перспективным представляется использование явления ионного ветра в комбинированных установках для преобразования кинетической энер-

гии ветра. Например, в конструкциях Giromile с регулируемыми активными поверхностями лопастей [11]. Освоив ионное управление частицами воздуха в окрестности вращающихся цилиндрических тел, можно ожидать качественно новых технических решений по совершенствованию ветродвигателя Магнуса [12, 13].

### Выводы

Побуждение к поступательному движению ионизированных частиц газа под влиянием внешнего электрического поля, называемое ионным ветром, является перспективным способом образования газовых потоков, способным найти широкое применение в различных технологических процессах АПК.

### Библиографический список

1. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: Справочник. М.: Машиностроение, 1980. 176 с.
2. Рысин С.А. Справочник по вентиляторам. М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1951. 247 с.
3. Robinson M. (1962, May) History of the electric wind. American journal of Physics, 30 (5). P. 362-372.
4. Криштафович И.А., Криштафович Ю.А. Ионный ветер и его применение. URL: <http://www.treeair.com/ion.pdf> (дата обращения: 10.10.2013).
5. Пшеченков К.А., Зейрук В.Н., Еланский С.Н., Мальцев С.В. Технологии хранения картофеля. Картофелевод. М., 2007. 192 с.
6. Блинов Е.А. Топлива и теория горения. Подготовка и сжигание топлива – учебно-методический комплекс: Учебное пособие. СПб: Изд-во СПГУ, 2007. 119 с.

7. Андреев С.А., Овсянников В.О. О возможности использования ионных двигателей в технологических процессах // Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики: Материалы VI Международной научно-практической конференции «Наука – Технология – Ресурсосбережение»: Сборник научных трудов. Киров: ФГБОУ ВПО Вятская ГСХА, 2013. Вып. 14. С. 8-13.

8. Ветроэнергетика / Под ред. Д. де Рензо: Пер. с англ.; Под ред. Я.И. Шефтера. М.: Энергоатомиздат, 1982. 272 с.

9. Андреев С.А., Грустливый Н.М. Исследование динамики ионизации воздуха в рабочем пространстве электродинамического генератора // Энергетика, электротехнология и информатика в сельском хозяйстве: Сборник научных трудов МГАУ. М.: МГАУ, 1998. С. 29-33.

10. Андреев С.А., Грустливый Н.М. Электродинамические преобразователи кинетической энергии движущихся газов // Автоматизация сельскохозяйственного производства: Тезисы докладов Международной научно-технической конференции 13-16 мая 1997 г. М.: ВИМ, 1997. С. 81-83.

11. Синеглазов В.М., Алешкин С.С., Кульбака А.В. Анализ ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения // Электроника та системи управління. 2012. № 3 (33). С. 67-74.

12. Бычков Н.М., Коваленко В.М. Аэродинамические характеристики круговых цилиндров в поперечных потоках // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1980. № 8. Вып. 2. С. 114-124.

13. Бычков Н.М. Ветродвигатель с эффектом Магнуса: 1. Результаты модельных исследований // Теплофизика и аэромеханика. 2004. Т. 11. № 4. С. 583-596.

Статья поступила 14.07.2017

## USING THE EFFECTS OF ION WIND FOR TECHNOLOGICAL PROCESSES IN AGRICULTURE

**SERGEY A. ANDREYEV, PhD (Eng), Associate Professor**

E-mail: asa-finance@yandex.ru

**VLADIMIR I. ZAGINAILOV, PhD (Eng), Professor**

E-mail: energo-viz@mail.ru

**VIKTOR A. VOROBYEV, PhD (Eng), Professor**

E-mail: tatiana49@mail.ru

Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev; 127550, Timiryazevskaya Str., 49; Moscow, Russian Federation

The authors have theoretically studied the effect of ion wind and evaluated prospects of its utilization in some technological processes in agriculture. In some cases, traditional electromechanical fans can be replaced by electrostatic devices that produce translational motion of gases (ion wind) due to the action of an electric field on pre-ionized particles. Ion propellers contain an ionizer that focuses, accelerates, retards and precipitates elec-

trodes, as well as a neutralizer. The authors indicate specific functions of ion propulsors: making a uniform air flow; moving air at low pressures (0.50...0.75 mm of a water column); practically inertial changing the air flow direction, artificial moistening of the environment and grinding liquid particles in systems with sharp and capillary electrodes. The efficiency of the devices depends significantly on the energy consumption for the ionization of gas molecules. It has been estimated that the ionization of 1 m<sup>3</sup> of air requires 198 kWh, which is commensurate with energy consumption required to move 1 m<sup>3</sup> of air with a traditional electric fan. It has been indicated that to achieve an energy conversion coefficient of 15%, the ion mobility should be 10E-6 sq.m/V. Therefore, the use of ion wind is promising to be used with gases at elevated temperature or with a high content of suspended particles. Thus, artificial air exchange in vegetable stores, as well as the supply of air, oxygen or ozone, as well as other gaseous oxidants to the combustion chambers of boilers, do not require large capacities or high heads. By changing the spatial arrangement of electrodes, as well as the amount and pattern of voltage supply it is possible to form the gas motion in virtually any trajectory. This method of air exchange allows significant increasing the hygiene indicators of the process performance and reducing energy costs.

**Key words:** fans, air ionization, electric field, motion of charged particles.

### References

1. Solomakhova T.S., Chebysheva K.V. Centrifugal fans. Aerodynamic schemes and features: Reference book. Moscow, Mashinostroyeniye, 1980. 176 p. (in Rus.)
2. Rysin S.A. Reference book on fans. State Publishing House of Literature on Construction and Architecture. Moscow, 1951. 247 p. (in Rus.)
3. Robinson, M. (1962, May) History of the electric wind. American journal of Physics, 30 (5), Pp. 362-372.
4. Krishtafovich I.A., Krishtafovich Y.A. The ion wind and its application. URL: <http://www.treeair.com/ion.pdf> (Access date: 10.10.2013).
5. Pshechenkov K.A., Zeyruk V.N., Elanskiy S.N., Maltsev S.V. Potato storage technologies. Potato grower. Moscow, 2007. 192 p. (in Rus.)
6. Blinov Ye.A. Fuels and the theory of combustion. Preparation and combustion of fuel. Set of study materials: Textbook. St. Petersburg, SPUU Publishing House, 2007. 119 p. (in Rus.)
7. Andreyev S.A., Ovsyannikov V.O. On the possibility of using ion propulsion in technological processes. *The improvement of operational indicators of agricultural energy. Proceedings of the VI International scientific-practical conference "Science – Technology – Resource"*: Collection of scientific papers. Kirov: Vyatka State Agricultural Academy. 2013. Issue 14. Pp. 8-13. (in Rus.)
8. Wind Power. Ed. by D.J. Renzo. Translated from English by Ya.I. Shefter. Park Ridge, N.Y., Moscow, 1979. 272 p. (in Rus.)
9. Andreyev S.A., Grustliviy N.M. Research of the dynamics of air ionization in the working space of the electrodynamic generator. *Power engineering, electrotechnology and information technology in agriculture. Collection of scientific works MSAU*. Moscow, MSAU. 1998. Pp. 29-33. (in Rus.)
10. Andreyev S.A., Grustliviy N.M. Elektrodynamichestkiye preobrazovateli kineticheskoy energii dvizhushchikhsya gazov [Electrodynamic transducers of the kinetic energy of flowing gases]. *Avtomatizatsiya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii 13-16 May 1997*. Moscow, VIM, 1997. Pp. 81-83.
11. Sineglazov V.M., Aleshkin S.S., Kulbaka A.V. Analysis of wind turbines with a vertical rotation axis. *Electronic Control Systems*. 2012, No. 3 (33). Pp. 67-74. (in Rus.)
12. Bychkov N.M., Kovalenko V.M. Aerodynamic characteristics of a circular cylinder in cross flows. *Izv. SO USSR Academy of Sciences, Technical Sciences series*, 1980, No. 8, Issue 2, Pp. 114-124. (in Rus.)
13. Bychkov N.M. Wind turbine with Magnus effect: 1. Results of modeling studies. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2004. Vol.11, No. 4, Pp. 583-596. (in Rus.)

*The paper was received on July 14, 2017*