

## АЭРОДИНАМИКА ЦИКЛОННЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ БЛИЗКИХ К ПРЕДЕЛЬНЫМ УСЛОВИЯМ ВВОДА И ВЫВОДА ГАЗОВ

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрены особенности аэродинамики циклонных устройств при предельных и близких к предельным условиям ввода и вывода потока.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Использование циклонного принципа организации движения топочных и греющих газов, сушильных агентов и др. для интенсификации технологических процессов в различных областях промышленности и энергетике является одним из перспективных направлений и находит все более широкое применение [1–3]. Аэродинамика и конвективный теплообмен в циклонных камерах изучены достаточно подробно для таких устройств как топки, камеры сгорания, сепараторы лишь при средних значениях площадей входа и выхода потока [4]. Однако на практике зачастую целесообразно выбирать их значения, выходящие за исследованные пределы. Последнее может быть продиктовано, например, необходимостью снижения аэродинамического сопротивления аппаратов, интенсификации теплообмена, повышения полной или фракционной эффективности сепарации [5]. Поэтому актуально проведение специальных исследований в диапазоне значений геометрических параметров входа и выхода потока, равных или близких к предельным:  $h_{\text{вх}}=R_{\text{к}}$ ,  $d_{\text{вых}} \rightarrow 0$ . Такие исследования нужны и для разработки надежных расчетных формул, удовлетворяющих предельным условиям, и рекомендаций по проектированию, совершенствованию и расширению диапазонов применимости известных методик аэродинамического и теплового расчетов циклонных камер [4, 5]. Исследования подобного рода в литературе отсутствуют.

### 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовательская часть работы была выполнена на двух экспериментальных стендах принципиальная схема одного из которых показана на рис.1<sup>1</sup>. Циклонная камера была изготовлена из оргстекла и представляла собой полый гладкостенный цилиндр, с  $D_{\text{к}} = 179$  мм и длиной  $L_{\text{к}} = 272$  мм. Подвод воздуха осуществлялся тангенциально к внутренней поверхности камеры с двух диаметрально противоположных сторон через каналы с высотой  $h_{\text{вх}} = 13$  мм

поверхности камеры с двух диаметрально противоположных сторон через каналы с высотой  $h_{\text{вх}} = 13$  мм и длиной, размер по образующей,  $l_{\text{вх}} = 40$  мм. Безразмерная суммарная площадь входа потока  $\bar{f}_{\text{вх}} = 4f_{\text{вх}}/\pi D_{\text{к}}^2$  равнялась  $4,13 \cdot 10^{-2}$ . Отвод воздуха из циклонной камеры производился через пережим выходного торца, безразмерный диаметр которого  $\bar{d}_{\text{вых}}$  мог принимать значения от 0,1 до 0,4.

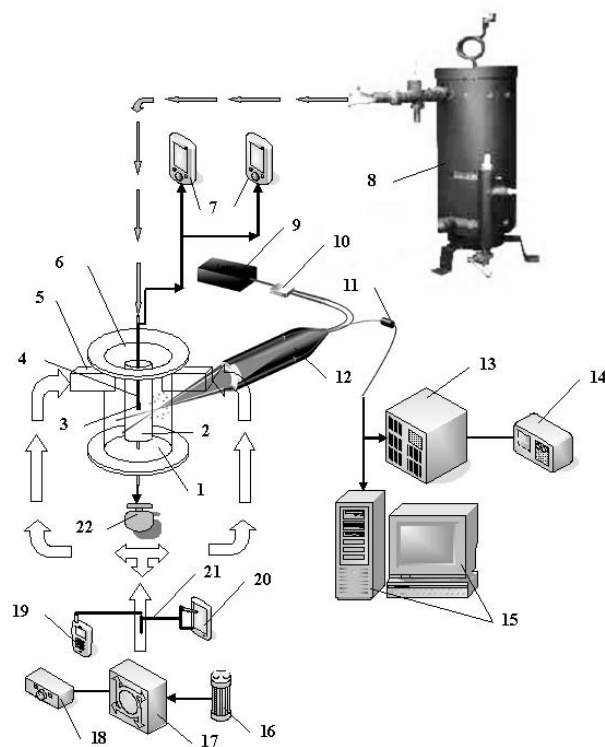


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – циклонная камера; 2 – цилиндр-вставка; 3 – термодатчик; 4 – термopар; 5 – входной канал; 6 – выходной торец; 7 – мультиметры; 8 – парогенератор; 9 – лазер; 10 – оптический коммутатор; 11 – фотомультипликатор; 12 – оптический зонд; 13 – контроллер-счетчик; 14 – осциллограф; 15 – компьютер с программным обеспечением; 16 – генератор тумана; 17 – воздуходувка; 18 – блок управления воздуходувкой; 19 – цифровой термометр; 20 – цифровой микроманометр; 21 – трубка Пито-Прандтля; 22 – бюретка для сбора конденсата водяного пара

Вставка (нагреваемая заготовка в печах, вытеснитель в циклонных сепараторах, дополнительная поверхность теплообмена в теплоутилизаторах) имитировалась полым алюминиевым цилиндром длиной 231,5 мм и диаметром  $d_{\text{в}} 61,5$  мм, что соответствовало параметру  $\bar{d}_{\text{в}} = d_{\text{в}}/D_{\text{к}} = 0,344$ . Цилиндр располагался в циклонной камере соосно с ее рабо-

<sup>1</sup> Стенд создан в лаборатории лазерной техники Университета прикладных наук г. Эмден (Германия).

чим объемом. Торцы цилиндра отстояли от торцевых поверхностей рабочего объема на расстоянии 23 мм. Система крепления исключала вибрацию цилиндра и не вносила существенных возмущений в поток.

Измерение скоростных характеристик осуществлялось лазерным измерителем скорости (ЛДИС) с дифференциальной оптической схемой на аргоновом лазере фирмы «Ion laser technology» (США). Использование ЛДА – технологии аэродинамических позволяет практически исключить [6] отрицательное влияние зондовой аппаратуры на аэродинамику циклонного потока, весьма чувствительную к внесению в измеряемую систему возмущений.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1. Особенности аэродинамики циклонных устройств при предельных условиях ввода газов

Некоторые из полученных в работе результатов, относящихся к опытам с предельным значением  $\bar{h}_{\text{вх}} = 0,5$ , показаны на рис.3.

Как следует из анализа распределений безразмерных (отнесенных ко входной  $v_{\text{вх}}$ ) тангенциальной  $\bar{w}_\phi$  и аксиальной  $\bar{w}_z$  скоростей, статического  $\bar{p}_c = 2p_c/(\rho_{\text{вх}}v_{\text{вх}}^2)$  ( $\rho_{\text{вх}}$  – плотность воздуха во входном канале) и полного  $\bar{p}_\Pi = 2p_\Pi/(\rho_{\text{вх}}v_{\text{вх}}^2)$  давлений, течение во входном канале не является плоским и обладает определенной пространственностью (рис.2). При движении газов вдоль входного канала безразмерные максимальная тангенциальная составляющая скорости потока  $\bar{w}_{\phi\text{м}}$  (рис.3) и статическое давление на его внешней стенке  $\bar{p}_{c,\text{вх}}$  снижаются с меняющейся в зависимости от значений  $\bar{h}_{\text{вх}}$  и  $\bar{d}_{\text{вых}}$  интенсивностью. Поперечный (по координате  $y$ ) градиент давления в канале с  $\bar{h}_{\text{вх}} = 0.5$  приводит к смещению максимума  $\bar{w}_\phi$  вначале к внутренней стенке, а при  $\bar{x}$ , близких к 1 – к оси входного канала.

При входе потока в рабочий объем циклонной камеры происходит его взаимодействие с боковой поверхностью и уже закрученными ранее введенными газами, что вызывает дальнейшие значительные изменения в распределениях скоростей и давлений в очень узком диапазоне координаты  $0.92 \leq \bar{x} \leq 1$ . Коэффициент скоростного поля

$$K_{\phi\text{м}} = \frac{1}{w_{\phi\text{м}}\rho_{\text{вх}}f_{\text{вх}}} \int_0^{f_{\text{вх}}} w_\phi \rho df \approx \frac{1}{\bar{w}_{\phi\text{м}}} \int_0^1 \bar{w}_\phi d\bar{y}, \quad (1)$$

где  $\rho, f$  – текущие плотность и площадь поперечного сечения потока, мало меняется по длине (координате  $\bar{x}$ ), практически не зависит от  $\bar{d}_{\text{вых}}$  при  $\bar{x} \leq 0.92$  и с коэффициентом доверительной вероятности 0.95 описывается корреляционной зависимостью

$$K_{\phi\text{м}} = 0.95 - \frac{0.0042\bar{x}}{\ln \bar{x}}. \quad (2)$$

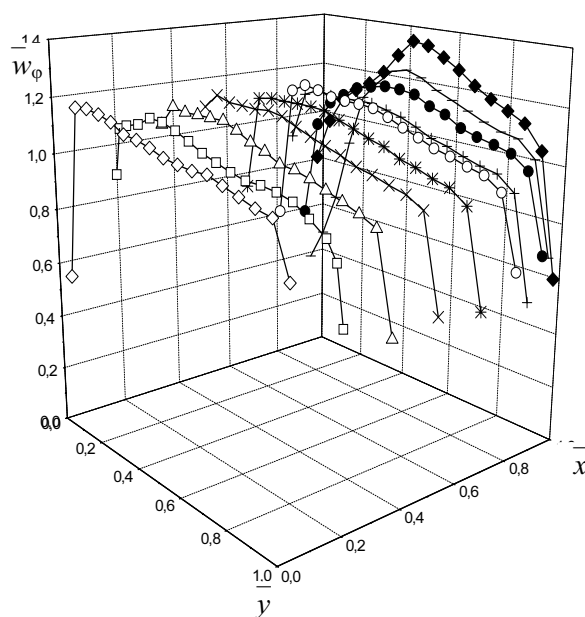


Рис. 2. Распределения  $w_\phi$  по высоте входного канала при различных значениях продольной координаты  $\bar{x}$ :  $\diamond - 0.0384$ ;  $\square - 0.199$ ;  $\Delta - 0.359$ ;  $\times - 0.519$ ;  $*$  – 0.679;  $\circ - 0.813$ ;  $+$  – 0.866;  $\bullet - 0.920$ ;  $- - 0.947$ ;  $\blacklozenge - 0.973$

Результаты математического моделирования изотермического течения циклонного воздушного потока с использованием специализированного пакета программ CFX показаны на рис.3.

Расчеты выполнены на основе SST (Shear Stress Turbulence) – модели турбулентности для изотермических условий течения потока.

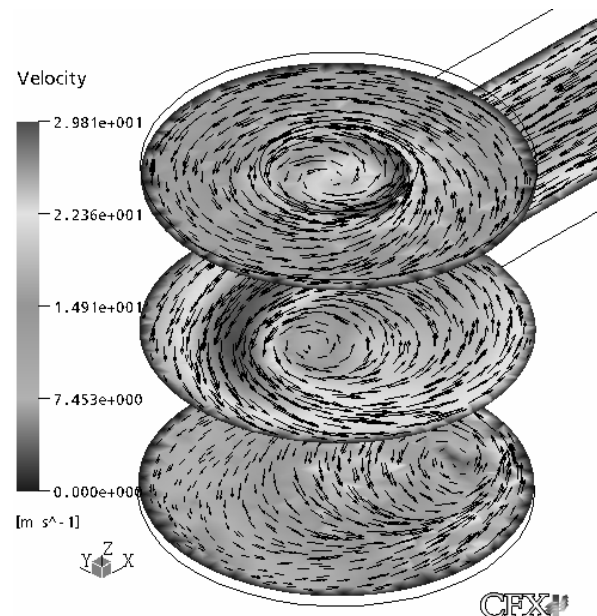


Рис.3. Векторная картина течения закрученного потока в различных по высоте циклонной камеры поперечных сечениях при  $\bar{h}_{\text{вх}}=0.5$ ;  $\bar{d}_{\text{вых}} = 0.4$ : 1 –  $\bar{z} = z/L_K = 0.031$ ; 2 – 0.5; 3 – 0.969

Как видно из рис.3, вводимая в циклонную камеру тангенциальная струя приводит не только к искривлению оси выходного вихря, но и возникновению нескольких взаимодействующих между со-

бой и локализованных вихревых зон. Сложная вихревая структура и неосесимметричность закрученного течения, особенно в сечениях ниже входного канала, в значительной степени обусловлены сочетанием двух факторов, заметно влияющих на аэродинамику циклонной камеры: односторонним вводом потока и выполнением предельного геометрического условия – равенства высоты входного канала и радиуса циклонной камеры.

Сравнение результатов вычислений по компьютерной программе CFX радиального распределения тангенциальной составляющей скорости в объеме циклонной камеры с опытными данными показано на рис.4. Здесь же приведены аппроксимационные зависимости, полученные авторами при экспериментальном исследовании предельных и близких к предельным условиям вывода газов из циклонной камеры [8, 10].

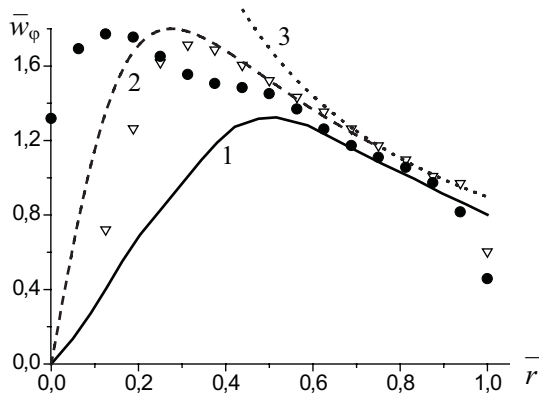


Рис.4. Сопоставление расчетных (линии) и опытных (точки) распределений безразмерной тангенциальной скорости циклонной камеры: 1 – численный расчет; 2 – расчет по уравнению (2); 3 – расчет по уравнению (3); ● –  $\varphi, \circ = 0$ ; ▽ – 45

По условиям течения во внутренней зоне ядра

$$\bar{w}_\varphi = \bar{w}_{\varphi m} \left[ \frac{2\bar{r} / \bar{r}_{\varphi m}}{1 + (\bar{r} / \bar{r}_{\varphi m})^2} \right]^n, \quad (2)$$

где  $n$  – показатель степени, зависящий от геометрических характеристик циклонной камеры и учитывающий особенности течения в приосевой области потока [1–3].

По условиям течения во внешней (квазипотенциальной) зоне ядра при варьировании в широких пределах  $\bar{d}_{\text{ВЫХ}}$

$$\bar{w}_\varphi = \frac{1}{0.065 + 1.05\bar{r}}. \quad (3)$$

Как следует из представленных данных, результаты математического моделирования и расчетов по обобщающим зависимостям (2) и (3) вполне удовлетворительно согласуются с опытными данными во внешней области ядра циклонного потока. Расхождения в распределениях тангенциальной скорости во внутренней области ядра, особенно заметные для кривой 1, обусловлены, по-видимому, особенностями математической модели циклонного тече-

ния, приближенностью выбранной модели турбулентности, учетом предыстории формирования потока на входе в канал и др.

### 3.2. Особенности аэродинамики циклонных устройств при предельных и близких к предельным условиям вывода газов

На рис.5 приведены радиальные распределения безразмерной тангенциальной скорости  $\bar{w}_\varphi = w_\varphi / v_{\text{ВХ}}$  при различных значениях безразмерного диаметра  $\bar{d}_{\text{ВЫХ}}$ . Как следует из полученных данных, при уменьшении  $\bar{d}_{\text{ВЫХ}}$  максимальные значения аксиальной  $\bar{w}_{zm}$  и тангенциальной скоростей в ядре потока меняются немонотонно: вначале растут до достижения определенного значения диаметра выходного канала, затем резко снижаются. Зависимость между соотношением скоростей  $\bar{w}_{zm} / \bar{w}_{\varphi m}$ , характеризующим степень закручивания потока в циклонном устройстве, и  $\bar{d}_{\text{ВЫХ}}$  также носит довольно сложный характер. Экспериментальные данные обобщаются уравнением

$$\bar{w}_{zm} / \bar{w}_{\varphi m} = a + b\bar{d}_{\text{ВЫХ}} + c\bar{d}_{\text{ВЫХ}}^2 + b\bar{d}_{\text{ВЫХ}}^{2.5} + e \exp(-\bar{d}_{\text{ВЫХ}}), \quad (4)$$

где  $a = -483.39$ ;  $b = 484.71$ ;  $c = -283.86$ ;  $d = 104.63$ ;  $e = 483.99$ .

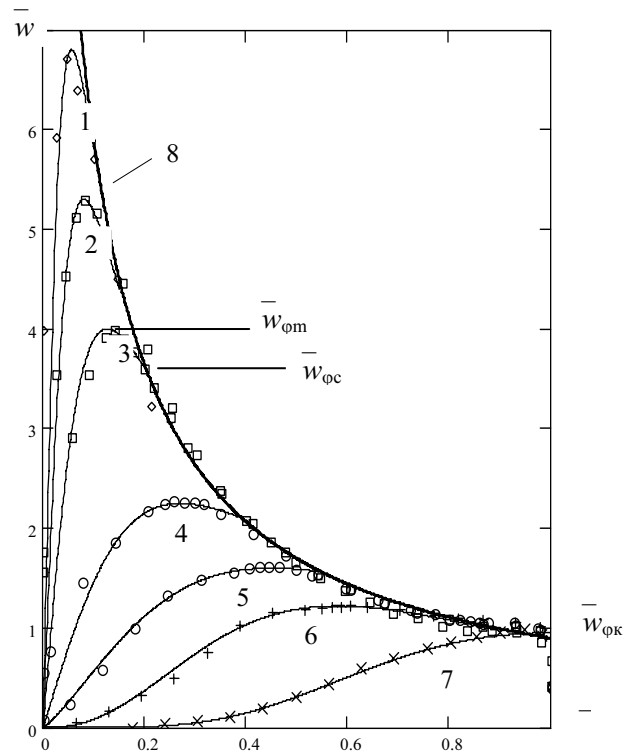


Рис.5. Радиальные распределения  $\bar{w}_\varphi$  при различных значениях  $\bar{d}_{\text{ВЫХ}}$ : 1 –  $\bar{d}_{\text{ВЫХ}} = 0.1$ ; 2 – 0.161; 3 – 0.2; 4 – 0.3; 5 – 0.4; 6 – 0.55; 7 – 0.8 (линии – расчет по уравнению (4)); 8 – расчет по уравнению (3)

Расчетная формула (4) справедлива при  $0 \leq \bar{r} \leq \bar{r}_c$ , где  $\bar{r}_c$  – безразмерный радиус, соответствующий точке сопряжения профиля  $\bar{w}_\varphi(\bar{r})$  (рис.5) с

кривой распределения  $\bar{w}_\varphi (r)$  в зоне квазипотенциального вращения (3)

$$\eta_c = \bar{r}_c / \bar{r}_{\varphi m} = 2.04 - 1.07 \exp(-\bar{f}), \quad (5)$$

где  $\bar{f} = \bar{f}_{\text{вх}} / \bar{f}_{\text{вых}} = \bar{f}_{\text{вх}} / \bar{d}_{\text{вых}}^2$  – безразмерный геометрический параметр, характеризующий соотношение площадей входа и выхода потока.

В результате обобщения экспериментальных данных получена также зависимость, связывающая тангенциальную скорость в точке сопряжения  $w_c$  и  $\bar{w}_{\varphi m}$

$$\bar{w}_c = \bar{w}_{\varphi c} / \bar{w}_{\varphi m} = 0.8 + 0.2 \exp(-\bar{f} / 1.8). \quad (6)$$

Количественной характеристикой уровня  $w_\varphi$  в периферийной области циклонного потока наряду с безразмерной тангенциальной скоростью на границе ядра течения [1–4]  $\bar{w}_{\varphi я} = w_{\varphi я} / v_{\text{вх}}$  может являться, на наш взгляд, и другая, более удобная с точки зрения граничных условий течения, безразмерная условная тангенциальная скорость на радиусе рабочего объема камеры [7, 8]  $\bar{w}_{\varphi к} = w_{\varphi к} / v_{\text{вх}}$  (рис.5). Связь скоростей  $\bar{w}_{\varphi я}$  и  $\bar{w}_{\varphi к}$  находится из зависимости (3):

$$\frac{\bar{w}_{\varphi я}}{\bar{w}_{\varphi к}} = \frac{1}{0.058 + 0.942 \bar{r}_я}. \quad (7)$$

Снижение уровня  $\bar{w}_\varphi$  в периферийной области циклонного потока при малых  $\bar{d}_{\text{вых}}$  ( $\bar{d}_{\text{вых}} < 0,2$ ) в этом случае, по-видимому, связано с уменьшением влияния выходного вихря на течение во внешней части квазипотенциальной зоны.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты и дальнейшее развитие рассмотренных исследований в широком диапазоне изменения  $\bar{h}_{\text{вх}}$  при одно- и двухстороннем вводе газов и обобщение полученных результатов позволят внести необходимые коррективы в имеющуюся методику расчета циклонных камер различного технологического назначения [1–5] и получить новые уточненные рекомендации по проектированию топок, камер сгорания, нагревательных печей и пылеуловителей.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$D_k, R_k, L_k$  – диаметр, радиус и длина циклонного устройства;  
 $d$  – диаметр;  
 $r$  – радиус;  
 $\eta$  – радиус, отнесенный к  $r_{\varphi m}$ ;  
 $h_{\text{вх}}$  – высота входного канала циклонной камеры;  
 $f$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$w_\varphi$  – тангенциальная скорость потока,  $\text{м/с}$ ;  
 $n$  – показатель степени в аппроксимационной зависимости для  $w_\varphi$ ;  
 $v$  – полная скорость потока,  $\text{м/с}$ ;  
 $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости при средней температуре потока,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  
 $x$  – продольная координата, отсчитываемая от торца входного канала;  
 $x$  – безразмерная (отнесенная к длине входного канала) продольная координата;  
 $z$  – осевая координата, совпадающая с осью камеры и отсчитываемая от ее глухого торца;  
 $\varphi^\circ$  – координатный угол.  
**Индексы:**  
 в – вставка;  
 вх, вых – параметры потока на входе и выходе из циклонного устройства;  
 к – величина на внутренней поверхности циклонной камеры;  
 я – величина на границе ядра циклонного течения;  
 $\varphi_m$  – величина, относящаяся к максимальной тангенциальной скорости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сабуров Э.Н., Карпов С.В.** Теория и практика циклонных сепараторов, топок и печей / Под ред. Э.Н. Сабурова. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2000. 568 с.
2. **Сабуров Э.Н.** Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. 341 с.
3. **Сабуров Э.Н., Карпов С.В.** Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве / Под ред. Э.Н. Сабурова. М.: Экология, 1993. 368 с.
4. **Сабуров Э.Н., Карпов С.В., Осташев С.И.** Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах / Под ред. Э.Н. Сабурова. Л.: 1989. 276 с.
5. **Карпов С.В., Сабуров Э.Н.** Высокоэффективные циклонные устройства для очистки и теплового использования газовых выбросов / Под ред. Э.Н. Сабурова. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 504 с.
6. **Ринкевичюс Б.С.** Лазерная диагностика потоков / Под ред. В.А. Фабриканта. М.: Изд-во МЭИ, 1990. 288 с.
7. **Карпов С.В., Сабуров Э.Н., Быков А.В.** Аэродинамика циклонных устройств при предельных условиях вывода газов // Вузовская наука – региону. – Вторая Всероссийская науч.- техн. конф. 27 февраля 2004 г. Вологда, 2004. С.38–41.
8. **Карпов С.В., Сабуров Э.Н., Быков А.В.** Особенности аэродинамики потока на входе в циклонное устройство // Современная наука и образование в решении проблем экономики Европейского Севера. Матлы Междунар. науч.- техн. конф., посвящ. 75-летию АЛТИ - АГТУ. Изд-во АГТУ, 2004. Т. 1. С.339–342.