

тивное использование теплофикационных турбоустановок в маневренном режиме, максимально снижая выдачу электрической мощности в энергосистему в ночные часы (вплоть до нуля).

2. Доля мощности электродвигателей  $N_{эк}$  от глубины требуемого снижения выдачи мощности в энергосистему  $\Delta P_{пр}$  существенно ниже для теплофикационных парогазовых установок (менее 30 %) по сравнению с традиционными паротурбинными установками (более 60 %).

3. В сравнении с разгрузкой отопительных отборов на топливоиспользующие котлы применение электродвигателей на ТЭЦ приводит к небольшому (менее 0,5 %) перерасходу топлива, однако достигаемое при этом снижение отпуска электроэнергии значительно выше фактической разгрузки установок: от полутора (для утилизационных парогазовых установок) до трех раз (для паротурбинных установок).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Короткевич, А. М. О балансе мощностей Белорусской энергосистемы и проблемах регулирования суточного графика нагрузок: настоящее и перспективы / А. М. Короткевич, О. Г. Фоменко // Энергетическая стратегия. – 2008. – № 2. – С. 24–28.

2. Трутаев, В. И. Применение электродвигателей на ТЭЦ как эффективный способ получения маневренной электрической мощности в энергосистеме Беларуси с вводом АЭС / В. И. Трутаев, В. М. Сыропушинский // Энергетическая стратегия. – 2010. – № 4. – С. 19–24.

3. Экономическая эффективность применения электродвигателей на ТЭЦ для регулирования суточных графиков электрических нагрузок Белорусской энергосистемы после ввода АЭС: отчет о НИР (заключ.) / РУП «БелНИПИэнергопром». – Минск, 2010.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 04.05.2012

УДК 532.5, 536.2, 621.183, 621.039.5

### ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ВИХРЕВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Канд. техн. наук КАЩЕЕВ В. П.<sup>1)</sup>, инж. ВОРОНОВ Е. О.<sup>2)</sup>,  
магистр техн. наук КАЩЕЕВА О. В.<sup>3)</sup>, докт. техн. наук ГАШЕНКО В. А.<sup>4)</sup>,  
инж. УЛАСЮК Н. Н.<sup>1)</sup>, канд. техн. наук СОРОКИН В. В.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет,

<sup>2)</sup>РУП «МИНСКЭНЕРГО»,

<sup>3)</sup>Университет Штутгарта (IGE),

<sup>4)</sup>Электрогорский научно-исследовательский центр  
по безопасности атомных электростанций

**Обогащение газов парами жидкости и получение туманов.** Во всех промышленных парниково-тепличных комбинатах применяются установки для создания высокой влажности, так как без нее не укореняются черенки растений, плохо растут и дают малый выход товарной продукции посаженные растения. Существующие устройства повышения влажности в помещениях или примитивны и в недостаточной мере выполняют свое предназначение, или же являются дорогостоящими для рядового потребителя. Еще хуже положение с устройствами, которые могут мелкодисперсно рас-

пылять в больших помещениях различные жидкости, порошки твердых веществ, образовывать аэрозоли.

Изобретение [1] позволяет создать компактные и дешевые установки-туманообразователи для промышленных парников, теплиц, складов, испытательных полигонов и других объектов. Была разработана техническая документация для изготовления установки-туманообразователя для парников и теплиц площадью 2 га. Она позволяет в широких пределах регулировать влажность воздуха в различных промышленных цехах (например, ткацких) и на объектах, где влажность воздуха регламентируется. Кроме того, оборудование создает в помещениях нужный состав газов и аэрозолей или вводит в их атмосферу пыль требуемых твердых веществ.

Разработанное авторами изобретение может быть использовано в целях обороны для создания установки, образующей туман с заданными характеристиками. Также с ее помощью можно исказить размеры объекта, изменить частоту отражаемого сигнала, сбивая с толку противника (наблюдателя). Иногда какие-то действия на объекте или сам объект необходимо скрыть от глаз наблюдателей, самолетов-разведчиков, космических спутников слежения и т. д. Одним из решений этой проблемы может быть образование над объектом полосы тумана, подобного природному и часто встречающемуся в Беларуси, на Украине. Но искусственный туман можно получить с заранее заданными свойствами, с определенными размерами капелек влаги; капли могут содержать определенные вещества ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$  и др.), делающие объекты невидимыми для лучей лазера, излучения локатора простого наблюдения и т. д.

В состав тумана можно вводить пыль различных веществ. Поскольку желательно вводить пыль с очень мелкими частицами, витающими в воздухе (порядка нескольких микрон), потребовалось специальное устройство для получения таких сверхмелкодисперсных частиц. Оно разработано, изготовлено и испытано авторами (вихревая мельница). Исследованиями были установлены оптимальные конструкции и параметры работы таких устройств. Кроме того, оказалось, что необходимо иметь специальные сепараторы для улавливания сверхмелкодисперсных частиц. Такие сепараторы были авторами изготовлены и показали успешную работу.

Исследования, проведенные в БНТУ и НАН Беларуси, показали, что можно создать установки, производящие туман с заданными характеристиками в промышленных масштабах ( $90000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), затрачивая на это около 1,5–2,0 т/ч топлива типа авиационного керосина.

Установки можно сделать компактными, передвижными: перевозить на грузовом транспорте или доставлять вертолетами. Необходимо отметить, что имеется возможность создания управляемого тумана для специального воздействия на какие-то излучатели (например, на приемо-передающие спутниковые антенны) с целью ухудшения их деятельности или необходимости блокирования их на какое-то время. Разработанные установки можно использовать для дезактивации и дезинфекции разнообразных объектов, а также для борьбы с грызунами (на складах и кораблях), насекомыми.

Предлагаемые установки имеют меньшие массогабаритные характеристики и стоимость по сравнению с традиционным оборудованием, так как для образования тумана используется другой принцип: процесс проходит в поле

центробежных сил с большими скоростями, причем в объеме устройства, в то время как в традиционных установках – в одной плоскости.

**Использование вихревых устройств для тушения пожаров.** При тушении крупномасштабных пожаров большое значение имеют количество инертной среды, подаваемой к месту горения, ее состав. Место горения нужно не только изолировать от доступа кислорода, но и желательнее охладить, так как есть вещества, горящие без доступа кислорода (например, термитная смесь). При низкой температуре химические реакции замедляются или вообще не происходят.

Как известно, хорошо тушить очаги возгорания инертной средой с мелкодисперсными каплями воды. Для испарения этих капель требуется затратить энергию на фазовый переход. Именно поэтому эффективно тушение горящих сред туманом инертной среды. Изобретение [1] позволяет модернизировать передвижные устройства газовой водяной пожаротушения типа АГВТ-100 или АГВТ-150, использующие турбореактивные двигатели. Кроме того, применение других, еще не запатентованных разработок авторов позволяет повысить эффективность вышеупомянутой струйной противопожарной техники, которую можно будет применять для тушения лесных пожаров, пожаров на промышленных объектах и нефтепромыслах.

Так, передвижная наземная установка имеет производительность до 60–100 т воды в час в виде тумана с инертными газами. Затраты топлива при этом составляют 2–3 т/ч. Испытания установки проводили на модели устройства. Они показали, что туманообразователь (ТО) устойчиво работает при переменных режимах, не прекращает работу даже при сильных ударах, имитирующих взрывы. Эксперименты на полномасштабных передвижных устройствах газовой водяной пожаротушения не проводились, так как это требует значительного финансирования.

Названный способ позволяет создавать устройства на различные расходы газа (для своих геометрических размеров): от крошечных форсунок и ТО для теплиц до устройств для тушения массовых пожаров (лесных, на нефтеперерабатывающих заводах, аэродромах, в складах, а также в зданиях в случае применения зажигательных авиабомб). Для туманообразователя в последних случаях могут быть использованы инертный или малоактивный газ, выхлопные газы двигателей, в том числе при соответствующих условиях и жидкостях – авиационного турбореактивного.

**Физические процессы в камере вихревого туманообразователя и испарителя.** Так как физические процессы, происходящие в камере вихревого ТО и испарителя, похожи и происходят при подаче в камеру смешения перегретой воды или газа, пара и воды или только газа (в том числе нагретого) и воды, рассмотрим более простой для проведения экспериментов случай, когда в камеру смешения подаются горячий газ (воздух) и вода. Такое смешительное устройство представлено на рис. 1.

Вихревое устройство (рис. 1) работает следующим образом. Газ по патрубку 6 подается в раздающую камеру 4, откуда через направляющий аппарат 3 тангенциально входит в камеру смешения 2 и по спиральной траектории движется к выходу из нее. В направляющем аппарате 3 газ приобретает требуемые направления и скорость при входе в камеру смешения 2. Через форсунки 7 в камеру 2 подается обессоленная вода (конденсат).

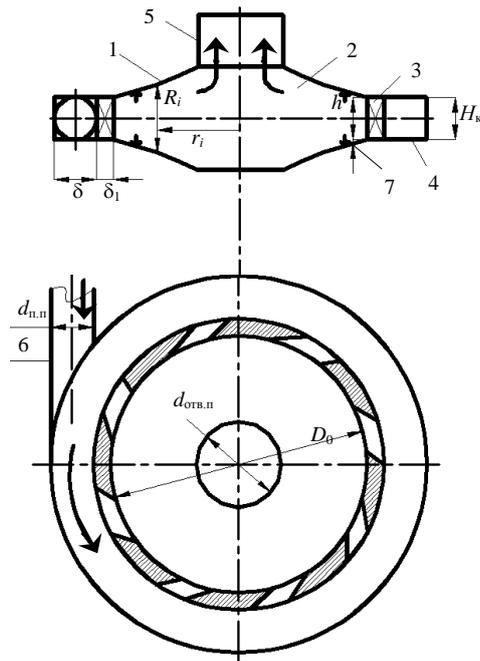


Рис. 1. Вихревое смесительное устройство: 1 – корпус смесителя; 2 – камера смешения газа и воды; 3 – направляющий аппарат; 4 – раздающая камера; 5 – туманоотводящий патрубок; 6 – патрубок для отвода газа; 7 – форсунки для подвода воды

Для устойчивой и надежной работы ТО (испарителя) вихревого типа при его расчете необходим правильный выбор скорости вращения кольца воды в камере смешения. Поэтому важно иметь нужную скорость газа (пара) на выходе из камеры. Поскольку точный расчет локальных характеристик потока на основе системы уравнений сохранения в силу ее нелинейности затруднителен, дадим некоторые приближенные интегральные оценки исследуемых величин. Вначале предположим, что жидкость во вращающемся кольце идеальная, а режим ее течения – турбулентный. Также предположим, что редуцированный пар выходит из кольца воды со скоростью, равной скорости воды на внутренней поверхности кольца.

Вероятно, вода кольца в промежутке между щелями направляющего аппарата касается его, поэтому в среднем зазор между ним и кольцом мал, и при расчетах в первом приближении можно считать  $R_1 = R_2$ . Здесь  $R_1$  – максимальный радиус камеры смешения;  $R_2$  – максимальный (наружный) радиус вращающегося кольца воды.

При исследовании для вращающегося слоя используем уравнения сохранения момента импульса и материального баланса для стационарных условий (динамического равновесия).

**Уравнение сохранения момента импульса.** Поскольку в рассматриваемом случае основные моменты сил, действующих в системе, находятся в плоскости, перпендикулярной оси камеры смешения, и приложены равномерно по кольцевой поверхности, то для упрощения задачи рассмотрим действие данного закона в проекции на эту плоскость.

Баланс подвода и отвода момента импульса такой: поступающий из направляющего аппарата газ передает свой момент количества движения кольцу воды, сюда же добавляется момент количества движения входящей воды, а теряется из системы (кольца) момент количества движения только с уходящим туманом. Причем все действующие силы приложены по касательной к кольцу. Так как вклад в суммарный момент количества движения, вносимый входящей водой, мал (ее скорость 5–10 м/с, расход в несколько раз меньше расхода газа, а направление движения близко к перпендикулярному к плоскости вращения кольца), то им можно пренебречь.

Таким образом, для стационарного режима работы ТО, перейдя к массовым расходам, получим

$$GvR_2 = G_p v_p R_3, \quad (1)$$

где  $G$ ,  $v$  – расход и скорость входящего газа;  $G_p$ ,  $v_p$  – расход и скорость тумана;  $R_3$  – внутренний радиус вращающегося кольца воды.

Согласно сделанным допущениям,  $v_p = v_k$ , где  $v_k$  – линейная скорость вращения кольца воды.

#### Уравнение материального баланса

$$G + G_b = G_p, \quad (2)$$

где  $G_b$  – расход воды.

Если обозначить  $\frac{G_b}{G} = \alpha$ , то последнее соотношение можно записать

$$G_p = G(1 + \alpha).$$

Расход воды  $G_b$  определяется из уравнения теплового баланса поступающего газа (с энтальпией  $h_0''$ ), уходящего тумана (с энтальпией  $h_p''$ ) и воды (с энтальпией  $h_b'$ )

$$h_0''G + h_b'G_b = h_p''G_p. \quad (3)$$

При сделанных ранее допущениях с учетом (1) и (2) для скорости вращения кольца запишем

$$v_k = v \frac{1}{1 + \alpha} \frac{R_2}{R_3}. \quad (4)$$

Или, учитывая, что  $R_3 = R_2 - \delta = R_2(1 - x)$ , получим

$$v_k = v \frac{1}{1 + \alpha} \frac{1}{1 - x}. \quad (5)$$

Если предположить, что режим течения воды во вращающемся кольце потенциальный, то для него закон распределения скорости по радиусу  $r$  кольца – гиперболический:  $v_{ki}r = \text{const}$ . В этом случае, если известна ско-

рость ( $v_{k3} = v_p$ ) на внутреннем радиусе кольца  $R_3$ , то текущая скорость кольца

$$v_{ki} = v_p \frac{R_3}{r} = v_p \frac{R_2 - \delta}{r}. \quad (6)$$

С учетом (4) получаем

$$v_{ki} = v \frac{1}{1 + \alpha} \frac{R_2}{R_3} \frac{R_3}{r} = v \frac{1}{1 + \alpha} \frac{R_2}{r}. \quad (7)$$

На наружной стороне кольца (т. е. при  $r = R_2$ ) скорость кольца равна

$$v_{\text{нар}} = v \frac{1}{1 + \alpha}, \text{ а в центре кольца}$$

$$v_{\text{центр}} = v \frac{1}{1 + \alpha} \frac{R_2}{R_2 - 0,5\delta} = v \frac{1}{1 + \alpha} \frac{1}{1 - 0,5x}.$$

Так как значение  $x$  близко к 0,1, то при использовании выражений (4) и (7) для скорости при промежуточном (турбулентном) и потенциальном режимах течения разница составляет: для центра кольца – около 5%, для его наружной части ~10%. То есть при расчетах без большой ошибки можно использовать любой из законов распределения скорости по радиусу.

Введем некоторые упрощения, свойственные идеальным процессам. Также будем считать, что параметры потока газа остаются постоянными во времени, т. е. режим течения стационарный, и процесс течения газа в щелях направляющего аппарата проходит по обратимой адиабате (изоэнтропе). В этом случае скорость пара на выходе из щелей направляющего аппарата и входе в камеру смешения можно определить следующим образом (выражая работу расширения газа в адиабатном процессе и работу внешних сил через параметры состояния газа):

$$v = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} + v_{\text{труб}}^2 \right]}, \quad (8)$$

где  $k$  – показатель адиабаты;  $p_0, \rho_0, v_{\text{труб}}, p, \rho, v$  – давление, плотность и скорость газа в трубопроводе на входе в направляющий аппарат и выходе из него соответственно. Из литературных источников для газа (перегретого пара)  $v_{\text{труб}} = 20\text{--}100$  м/с, для насыщенного пара  $v_{\text{труб}} = 20\text{--}40$  м/с [2, с. 554];  $k$  – показатель адиабаты: для перегретого пара  $k = 1,3$ , для сухого насыщенного пара  $k = 1,135$ , для влажного пара  $k = 1,035 + 0,1\zeta$  ( $\zeta$  – степень сухости).

Если обозначить  $\frac{p}{p_0} = \beta$  и  $\frac{k}{k-1} = \varphi$ , то:

$$v = \sqrt{\frac{2p_0}{\Phi\rho_0}(1-\beta^{\varphi}) + v_{\text{труб}}^2}. \quad (9)$$

**Уравнение неразрывности** (материального баланса) для газа на входе и выходе его из направляющего аппарата можно записать следующим образом:

$$G = \rho S_{\text{щ}} v = \rho_0 S_{\text{труб}} v_{\text{труб}}, \quad (10)$$

где  $S_{\text{труб}}$ ,  $S_{\text{щ}}$  – площадь проходного для газа сечения щелей направляющего аппарата и подводящего трубопровода соответственно:  $\frac{S_{\text{труб}}}{S_{\text{щ}}} = \gamma$ .

Тогда выражение для  $v$  из уравнения неразрывности примет следующий вид:

$$v = \gamma \frac{\rho_0}{\rho} v_{\text{труб}}. \quad (11)$$

Так как для адиабатического процесса  $\rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{k}}$ , выражение для скорости  $v$  запишется следующим образом:

$$v = \gamma \beta^{\frac{1}{k}} v_{\text{труб}}. \quad (12)$$

Формулы (9) и (12) для скорости входа газа в камеру смешения представляют собой систему двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными  $v$  и  $\beta$ , из решения которой можно найти данные величины. Приравняв скорости по этим выражениям, после простых алгебраических преобразований получаем уравнение, из которого определяем  $\beta$ :

$$\beta^{\frac{k+1}{k}} - A\beta^{\frac{2}{k}} + B = 0, \quad (13)$$

где  $A = I + C$ ;  $B = \gamma^2 C$ ;  $C = \frac{v_{\text{труб}}^2 \Phi \rho_0}{2\rho_0}$ .

Найдя из (13) величину  $\beta$ , определяем значение скорости пара на входе в камеру смешения, а по выражению (5) – скорость вращения кольца охлаждающей воды.

Результаты расчетов по уравнению (13) относительного проходного сечения  $\gamma$  для газа при скоростях в подводящем трубопроводе  $v_{\text{труб}}$  40 и 100 м/с и давлении газа 0,3–14,0 МПа для различных значений  $\beta$  (относительно перепада давлений на направляющем аппарате) представлены на рис. 2. На рисунке также показана зависимость скорости газа  $v$  на выходе из направляющего аппарата от  $\gamma$  и  $\beta$ .

Как видно из рис. 2, при  $p_0 = 7$  МПа и  $v_{\text{труб}} = 100$  м/с для достижения скорости газа на входе в камеру смешения 300 м/с достаточно уменьшения проходного сечения (по сравнению с подводящим трубопроводом) в на-

правляющем аппарате в 2,5 раза (что соответствует перепаду давлений на нем 0,81).

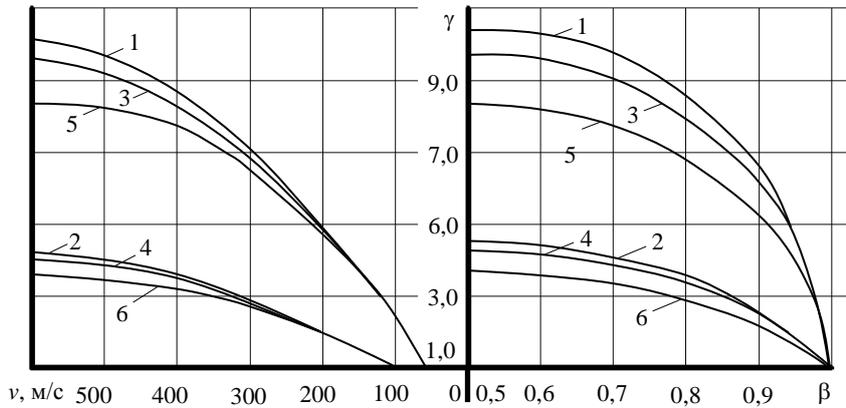


Рис. 2. Скорость газа на выходе из направляющего аппарата:  
 1 –  $v_{\text{труб}} = 40$  м/с,  $p_0 = 3,0\text{--}14,0$  МПа; 2 – 100, 3,0–14,0; 3 – 40, 2,5; 4 – 100, 2,5;  
 5 – 40, 0,3–1,0; 6 – 100 м/с, 0,3–1,0 МПа

Как следует из (5), скорость вращения кольца охлаждающей воды линейно зависит от скорости газа и мало отличается от нее. Так как при выводе выражений для скорости вращающегося кольца воды было сделано предположение, что скорость постоянна по радиусу слоя (или же следует гиперболическому закону), рассмотрим допустимость этого предположения. Выбор закона изменения скорости по кольцевому слою зависит от его структуры. При течении жидкости в слое по закону вращения твердого тела («замороженный» вращающийся слой) тангенциальная составляющая скорости  $w_\tau = wr$  (при этом угловая скорость  $w = \text{const}$  для любого текущего радиуса  $r$ ).

При промежуточном режиме течения жидкости можно предположить, что  $w_\tau = \text{const}$  по радиусу  $r$  слоя, а при потенциальном режиме течения

$w_\tau = w_0 \frac{R^2}{r}$ , где  $w_0$  – тангенциальная составляющая скорости на внешней границе кольца.

Относительно поведения жидкости во вращающемся кольцевом слое следует предположить, что течение жидкости в слое турбулентное (расчеты показали, что значение числа Рейнольдса для воды в кольце порядка  $10^7$ ).

Кроме подвода кинетической и тепловой энергии с наружной стороны кольца, турбулизации кольцевого слоя способствует подвод в него воды со скоростью и плотностью, отличающимися от скорости и плотности воды в кольце. Кипение жидкости в слое, прилегающем к внутренней поверхности кольца, и уход газа (тумана) с нее также турбулизируют жидкость в кольце.

Испарение понижает температуру воды в области, прилегающей к внутренней стороне кольца, что увеличивает ее плотность, а пузыри пара создают области с пониженной плотностью. Это в поле центробежных сил

приводит к перемешиванию воды в кольце. Вращающееся кольцо работает как сепаратор, перемещая более тяжелые части системы на периферию, а более легкие – в центр кольца.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о турбулентной структуре вращающегося слоя и его интенсивном перемешивании [3]. Турбулентность вызывает перемешивание воды и выравнивание скоростей, состава и температур по кольцу.

Определим радиальную скорость перемещения жидкости в кольце охлаждающей воды. Так как известны расходы воды  $G_B$  и газа  $G$ , которые проходят через кольцо воды, а также сечение  $S$  для прохода воды по радиусу в камере смешения, радиальную скорость воды  $w_r$  можно представить

$$w_r = \frac{G_B + G}{\rho_B S}, \quad (14)$$

где  $\rho_B$  – средняя по радиусу кольца плотность воды.

Поскольку профиль камеры смешения выбран гиперболическим, величина проходного сечения  $S$  камеры по радиусу постоянна и равна  $S = 2\pi h_0 R$  (в рассматриваемом случае равна величине поверхности направляющего аппарата). Здесь  $h_0$  – высота направляющего аппарата.

Представляет интерес сравнить радиальную и окружную (тангенциальную) скорости воды в кольце, а также скорость газа в подводящем паропроводе. Сравнить радиальную и тангенциальную скорости кольца можно только после численных расчетов последней, а со скоростью газа в подводящем трубопроводе – без сложных расчетов. Используя выражения (10) и (14), получаем

$$\frac{w_r}{w_{\text{труб}}} = \left(1 + \frac{G_B}{G}\right) \frac{\rho_0}{\rho_B} \frac{S_{\text{труб}}}{S}. \quad (15)$$

Для высоких параметров пара получается, что скорость  $w_r$  примерно в 20–25 раз меньше скорости газа в подводящем трубопроводе и составляет около 2,0–4,0 м/с.

Таким образом, учитывая толщину слоя воды, газ входит в камеру вихревого туманообразователя и выходит из нее в виде тумана менее чем за секунду. Тангенциальная скорость значительно больше радиальной.

Сравним радиальную составляющую  $v_{pr}$  скорости тумана (его тангенциальную составляющую исследовали ранее) и скорость газа, подводимого к кольцу воды. Выразим расходы тумана и входящего газа следующим образом:

$$G = 1 + \alpha = v_{pr} \rho_p S;$$

$$G = \rho v S \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – доля щелей в направляющем аппарате.

Отсюда получаем

$$\frac{v_{pr}}{v} = (1 + \alpha) \varepsilon \frac{\rho}{\rho_0}.$$

Таким образом, зная скорость газа, подводимого к кольцу воды, можно определить его радиальную скорость.

### ВЫВОДЫ

Представленное в статье изобретение позволяет создать компактные и дешевые установки-туманообразователи для промышленных парников, теплиц, складов, испытательных полигонов и других объектов. Кроме того, возможна модернизация передвижных устройств газоводяного пожаротушения типа АГВТ-100 или АГВТ-150, использующих турбореактивные двигатели. Применение установки-туманообразователя в противопожарной технике повысит ее эффективность при тушении лесных пожаров, пожаров на промышленных объектах и нефтепромыслах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. С п о с о б обогашения газов парами жидкости и получения туманов: пат. Рос. Федерации / В. П. Кашеев [и др.]; заявитель Белорус. национ. техн. ун-т. – № 2.080.189. – 1992.
2. Т е п л о в ы е и атомные электрические станции: справочник / под общ. ред. А. В. Клименко и В. М. Зорина. – 4-е изд. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – 648 с.
3. К у х л и н г, Х. Справочник по физике: пер. с нем / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 12.03.2012