

4. При спотовой цене электроэнергии  $C_{эз}^{сп} < 0,3$  дол./кВт·ч) и глубине разгрузки 100 %  $N_{ном}$  целесообразно использовать вариант с электродотами.

5. При глубине разгрузки менее 50 %  $N_{ном}$  вариант с электродотами уступает варианту с баками-аккумуляторами. В промежутке 50–100 %  $N_{ном}$  варианты практически сопоставимы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Electricity Storage Association. – 2010.
2. Лысыков, Б. А. Подземные структуры / Б. А. Лысыков, Л. Л. Кауфман. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – Ч. 1 – 280 с.
3. Безлепкин, В. П. Регулировочный диапазон тепловых электростанций / В. П. Безлепкин, С. Я. Михайлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 168 с.
4. Усов, С. В. Режимы тепловых электростанций / С. В. Усов, С. А. Казаров. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 240 с.
5. Смирнов, П. Е. Исследование возможности применения турбоагрегатов ТЭЦ к прохождению провалов графиков электрической нагрузки / П. Е. Смирнов // Сб. науч. трудов. – М.: МЭИ, 1987. – № 142. – С. 28–35.
6. Тонконогий, А. В. Использование баков-аккумуляторов для перевода ТЭЦ в маневренный режим / А. В. Тонконогий, И. М. Горзиб // Сб. науч. трудов. – М.: МЭИ, 1987. – № 142. – С. 39–46.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 25.03.2013

УДК 532.5; 536.2; 621.183; 621.039.5

### ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В НЕМ МНОГОФАЗНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛОВЫХ ПОЛЯХ

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>, канд. техн. наук ХАИМОВ В. А.<sup>4)</sup>,  
доктора техн. наук ГАШЕНКО В. А.<sup>5)</sup>, СОРОКИН В. Н., инж. УЛАСЮК Н. Н.<sup>1)</sup>,  
докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т.<sup>1)</sup>, студ. КЛИМЕНКОВА О. Л.<sup>1)</sup>

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

<sup>2)</sup>РУП «Белэнерго»,

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

<sup>4)</sup>ЗАО «ЭНЕРГОСЕРВИС»,

<sup>5)</sup>Электрогорский научно-исследовательский центр  
по безопасности атомных электростанций

В связи с мировым экономическим кризисом усилилась конкуренция, возросло значение энергосбережения. В целях экономии энергоресурсов

необходимо разрабатывать и внедрять новые технологии, которые либо соответствуют, либо выше сегодняшнего мирового уровня.

Авторами разработан и испытан целый класс устройств, которые возникли в результате фундаментальных исследований многофазных течений в центробежных силовых полях, понимания механизмов происходящих в них процессов и их математического описания для оптимизации. Впервые предложен эффективный способ понижения давления и температуры пара в вихревых редуционно-охладительных и пароохладительных устройствах.

Важными элементами оборудования тепловых и атомных электростанций являются **редуционно-охладительные установки (РОУ) и пароохладители (ПО)**, от которых в значительной степени зависят надежность и время использования установленной мощности энергоустановок. Традиционные РОУ обладают невысокой надежностью, так как в них обрыв дроссельного клапана происходит примерно через 120 нагружений, а защитная рубашка (ЗР) пароохладителя выходит из строя приблизительно через 2000 ч непрерывной работы [1]. После ее поломки корпус ПО подвергается эрозионному износу непосредственным воздействием струи воды, вытекающей из форсунок, из-за чего срок его эксплуатации значительно сокращается.

Авторами предложен эффективный способ понижения давления и температуры пара, состоящий в пропускании пара через вращающееся кольцо охлаждающей воды (или другой жидкости), и на основе его разработано несколько конструкций РОУ, ПО, эффективных компактных туманообразователей, устройств для образования парогазожидкостных смесей и др. [2–26]. В их числе компактный ядерный двигатель для беспилотного транспортного средства, которое может перемещаться как в погруженном состоянии в морской или пресной воде, так и в атмосфере планеты [27, 28]. При движении в погруженном состоянии двигатель использует в качестве теплоносителя и рабочего тела морскую (или пресную) воду. Причем благодаря особому устройству не происходит отложения солей (накипи) на рабочих поверхностях. При полете устройства в атмосфере планеты в качестве теплоносителя и рабочего тела используется окружающий газ (например, воздух).

Положительная особенность двигателя – переход с одной рабочей среды на другую, например при вылете устройства из воды в атмосферу, происходит автоматически и практически мгновенно. Компактный двигатель имеет огромную удельную мощность, что позволяет использовать его в качестве источника энергии для транспортабельной по воздуху блочной энергоустановки, снабжающей теплом и электроэнергией удаленные поселки, экспедиции в труднодоступные районы планеты.

Эксперименты, проведенные авторами на стендах во ВНИАМе, ЭНИСе ВНИИАЭСе (ныне Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций) и в других организациях, показали, что компактные вихревые РОУ, ПО, туманообразователи и другие компактные вихревые устройства надежно работают в широких диапазонах нагрузок, не ломаются, устойчивы в переходных режимах, обладают пониженными шумовыми характеристиками.

**Математическое описание физических процессов в вихревых РОУ, ПО, парогенераторах и расширителях.** Как в РОУ, так и в ПО, вихревых парогенераторах, расширителях и других подобных вихревых устройствах происходит взаимодействие веществ в двух фазах – жидкой (вода) и газообразной (пар). Поэтому при математическом описании физических процессов, происходящих в них, используются одни и те же уравнения сохранения и один и тот же подход – движение и процессы переноса массы и энергии рассматриваются для каждой из фаз в отдельности и полученные при этом зависимости связываются в систему условиями, характеризующими протекание этих процессов на границе раздела фаз. Границы раздела можно рассматривать как поверхность разрыва, где законы сохранения формулируются в виде условий скачка.

Как известно, математической основой описания физических процессов, происходящих при движении вязких газов и жидкостей, являются уравнения Навье–Стокса, которые в векторной форме выглядят так:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} + \bar{\omega}, \nabla \bar{\omega} = -\rho^{-1} \text{grad} p + \nu \Delta \bar{\omega}; & (1) \\ \text{div} \bar{\omega} = 0, & (2) \end{cases}$$

где  $\bar{\omega} = \omega_1, \omega_2, \omega_3$  – вектор скорости, компоненты которого относятся к декартовой системе координат  $(X_1, X_2, X_3)$ ;  $t$  – время;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

Рассмотрен случай, когда массовые силы отсутствуют. Выражение (2) называют уравнением неразрывности. Если жидкость идеальная, т. е. лишенная вязкости ( $\nu = 0$ ), то система уравнений (1), (2) преобразуется в уравнение Эйлера, которое, например в инвариантной форме, выглядит так

$$\frac{\partial \bar{\omega}}{\partial t} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p, \quad (3)$$

где  $\bar{F}$  – вектор плотности массовых сил (сила тяжести, центробежные силы во вращающихся потоках).

Для вращающейся системы при ее исследовании эти уравнения расписывают в проекциях на базисные векторы цилиндрической системы координат  $(r, \varphi, z)$ , а для сферической капли жидкости – в сферической системе координат  $(r, \varphi, \theta)$ . Если поток (система) стационарен, то все частные производные по времени в уравнениях (1) и (3) равны нулю.

При рассмотрении движения без учета гравитационного поля и других силовых воздействий все составляющие вектора  $\bar{F}$  равны нулю. В камере смешения РОУ благодаря осевой симметрии потока равны нулю все производные по углу  $\varphi$ , а также можно считать, что из-за цилиндричности все производные по осевой координате  $z$  тоже равны нулю. При рассмотрении капли жидкости из-за симметрии равны нулю производные по углам  $\varphi$  и  $\theta$ . Интегрированием уравнений Навье–Стокса и необходимыми преобразованиями можно получить выражения для законов сохранения импульса, мо-

мента импульса и энергии потока. Эти же законы можно получить и из рассмотрения физической сущности процесса.

В общем виде законы сохранения (для системы «жидкость – пар») выглядят так [29, 30]:

$$\sum_{k=1,2} \frac{d}{dt} \int_{V_k(t)} \rho_k \psi_k dV = - \sum_{k=1,2} \int_{a_k(t)} \rho_k \psi_k (\bar{\omega}_k \cdot \bar{n}_k) da + \sum_{k=1,2} \int_{V_k(t)} \rho_k \phi_k dV - \sum_{k=1,2} \int_{a_k(t)} \bar{I}_k da \cdot \bar{n}_k + \int_{a_i(t)} \phi_i da. \quad (4)$$

Значения  $\psi_k$ ,  $\bar{I}_k$ ,  $\phi_k$ ,  $\phi_i$  для каждого локального мгновенного закона сохранения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения используемых в уравнении (4) символов

Закон сохранения	Символ			
	$\psi_k$	$\bar{I}_k$	$\phi_k$	$\phi_i$
массы	1	0	0	0
импульса	$\bar{\omega}_k$	$-\bar{T}_k$	$\bar{F}$	0
момента импульса	$\bar{\omega}_k \cdot \bar{r}$	$-\bar{T}_k \cdot \bar{R}^*$	$\bar{F} \cdot \bar{r}$	0
полной энергии	$U_k + \frac{1}{2} \omega_k^2$	$q_k - \bar{T}_k \cdot \bar{\omega}_k$	$\bar{T}_k \cdot \bar{\omega}_k$	0
энтропии	$\bar{S}_k$	$\frac{1}{T_k} q_k$	$\frac{1}{q_k} \Delta_k$	$\Delta_i$

\*  $\bar{R}$  – антисимметричный тензор, соответствующий радиусу-вектору  $\bar{r}$ .  
 Обозначения:  $V$  – объем;  $\bar{T}$  – тензор напряжений;  $T$  – температура (в градусах К);  
 $a$  – поверхность;  $\bar{n}$  – нормальный единичный вектор;  $u$  – внутренняя энергия на единицу массы.  
 Индексы:  $i$  – поверхность раздела;  $k$  – индекс, относящийся к фазе (жидкость или пар).

Благодаря уравнению (4) можно получить вторичные уравнения:

- умножая уравнение импульса на  $\bar{\omega}_k$ , получают уравнение механической энергии;
- вычитая уравнение механической энергии из уравнения полной энергии, находят уравнение для внутренней энергии.

Выражение (4) должно быть дополнено уравнением состояния

$$F(p, \rho, T) = 0. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) вместе с краевыми условиями полностью описывают поведение динамической системы в любой момент времени. Так как в предлагаемых устройствах (РОУ и ПО) пар проходит через вращающееся кольцо охлаждающей воды, важное значение для оптимизации процессов имеет учет влияния трения на скорость его вращения.

**Влияние трения на скорость вращения кольца воды.** Всякая реальная жидкость является вязкой, поэтому есть потери кинетической энергии на трение о стенки и сопротивление вихревому смешению. При больших скоростях движения сред, которые имеют место в камере смешения вихре-

вого типа, закон сопротивления движению является квадратичным. Поэтому необходимо оценить влияние трения на скорость вращения кольца охлаждающей воды в камере смешения.

Рассмотрим баланс кинетической энергии в камере смешения за какое-то время  $\Delta t$  в проекции на плоскость вращения кольца. За это время в камеру смешения со скоростью  $\omega$  вошла масса  $G\Delta t$  редуцируемого пара, со скоростью  $\omega_b$  вошла масса  $G_b\Delta t$  охлаждающей воды, а со скоростью  $\omega_p$  вышла масса  $G_p\Delta t$  редуцированного и охлажденного пара. Как указывалось ранее, вкладом энергии охлаждающей воды в поступающую в камеру смешения энергию можно пренебречь (из-за ее малости). Потери кинетической энергии на трение во вращающемся кольце охлаждающей воды составят  $\zeta M_k \frac{\omega_k^2}{2}$ , где  $\zeta$  – коэффициент сопротивления трению, учитывает внешнее трение кольца воды (о торцевые стенки и направляющий аппарат) и внутреннюю диссипацию;  $M_k$  – масса прошедшей через кольцо и циркулировавшей в нем за время  $\Delta t$  воды.

Таким образом, баланс кинетической энергии приближенно можно записать

$$G\Delta t \frac{\omega^2}{2} = \zeta M_k \frac{\omega_k^2}{2} + G_p\Delta t \frac{\omega_p^2}{2}. \quad (6)$$

Расходы редуцируемого  $G$  и редуцированного  $G_p$  пара можно выразить следующим образом:

$$G = S_{\text{ш}}\rho\omega = 2\pi R_1 h_0 \varepsilon \rho \omega = z\omega, \quad (7)$$

где  $z = 2\pi R_1 h_0 \varepsilon$ ;

$$G_p = G(1 + \alpha) = (1 + \alpha)z\omega. \quad (8)$$

Массу воды  $M_k$  можно выразить через массу кольца  $m_k$  и число оборотов  $n$  кольца за время  $\Delta t$ :  $M_k = m_k n$ . Число оборотов кольца  $n = f\Delta t$ , где  $f$  – частота вращения кольца, равная  $f = \frac{\omega_k}{2\pi R}$ . Здесь  $\bar{R} = R_2 - \frac{\delta}{2} = R_2(1 - 0,5x)$ .

Масса кольца для гиперболического профиля камеры смешения

$$m_k = \rho_b S \delta = \rho_b \delta 2\pi R_2 h_1.$$

Слагаемое баланса кинетической энергии, учитывающее потери на трение:

$$\frac{1}{2} \zeta m_k \frac{\omega_k^3}{2\pi R} \Delta t = \frac{1}{2} \zeta \rho_b \delta h_1 \omega_k^3 \frac{\Delta t}{1 - 0,5x}.$$

В предположении постоянства скорости воды в кольце по радиусу и  $\omega_p = \omega_k$  выражение (6) можно преобразовать следующим образом:

$$\omega_k^3 = \omega_k^2 G \psi - G \omega^2 \psi = 0, \quad (9)$$

где

$$\psi = \frac{2\pi \bar{R}}{\zeta m_k n} = \frac{1 - 0,5x}{\zeta \rho_b \delta h_0}.$$

Или, подставляя значения  $G$  и  $G_p$ , получаем

$$\omega_k^3 + (1 + \alpha) \sigma \omega_k^2 - \sigma \omega^3 = 0, \quad (10)$$

где  $\sigma = \psi z = \frac{2\pi(1 - \alpha)\varepsilon}{\zeta x} \cdot \frac{\rho}{\rho_b}$ .

Теперь рассмотрим, какое влияние на скорость вращения кольца оказывает трение (при прочих равных условиях). Введем величину  $\theta$ , равную отношению скорости вращения  $\omega_k$  кольца охлаждающей воды к скорости  $\omega_{k,б.тр}$ , которая была бы в отсутствии трения

$$\theta = \frac{\omega_k}{\omega_{k,б.тр}}.$$

Из выражений (6)–(8) при  $\zeta = 0$  можно получить

$$\omega = \sqrt{1 + \alpha} \cdot \omega_{k,б.тр}. \quad (11)$$

Подставив это выражение в (10), после преобразований получаем

$$\theta^3 + (1 + \alpha)^{\frac{3}{2}} \delta \theta^2 - (1 + \alpha)^{\frac{3}{2}} \delta = 0. \quad (12)$$

Если обозначить  $a = (1 + \alpha)^{\frac{3}{2}}$ , то выражение (6) преобразуется

$$\theta^3 + a \theta^2 - a = 0. \quad (13)$$

Корни кубического уравнения  $\omega_k$  или  $\theta$  можно найти, например, по формулам Кардано.

Для определения коэффициента сопротивления трению  $\zeta$  можно использовать формулу Филоненко, применимую в широком диапазоне числа Рейнольдса ( $Re = 4 \cdot 10^3 - 10^{12}$ ) [31]:

$$\zeta = \left[ 1,82 \lg \left( \frac{Re}{8} \right) \right]^{-2},$$

где  $Re$  – число Рейнольдса.

В области квадратичного закона сопротивления верна формула (в авторемодельной области, когда коэффициент сопротивления уже не зависит от скорости потока,  $Re > Re_{кр}$ )

$$\zeta = \left[ 2 \lg 3,7 \left( \frac{dr}{\Delta} \right) \right]^{-2},$$

где  $dr$  – гидравлический диаметр;  $\Delta$  – эквивалентная абсолютная шероховатость (для нержавеющей стали можно принять  $\Delta = 1 \cdot 10^{-5}$  м [31, с. 18].

Для всех турбулентных режимов пригодна также формула [31]

$$\zeta = 0,11 \left[ \left( \frac{\Delta}{dr} \right) + \left( \frac{68}{Re} \right) \right]^{-0,25}.$$

Число Рейнольдса равно  $Re = \frac{\omega_k dr}{\nu}$ , где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости и  $dr = \frac{4h_0\delta}{h_0 + 2\delta}$ .

Используя уравнение (7), были определены относительные скорости  $\theta$  вращения кольца охлаждающей воды в зависимости от его относительной толщины  $x$  (при прочих равных условиях) и от комплекса «а». Эти зависимости показаны на рис. 1 и 2 соответственно.

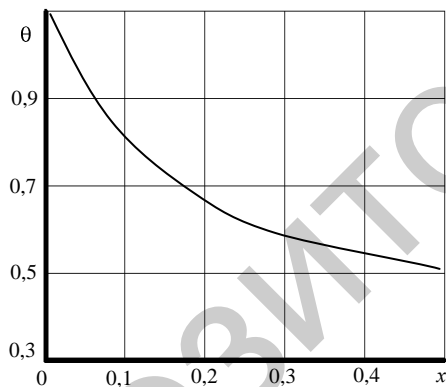


Рис. 1. Зависимость относительной скорости  $\theta$  вращения кольца воды от его относительной толщины  $x$

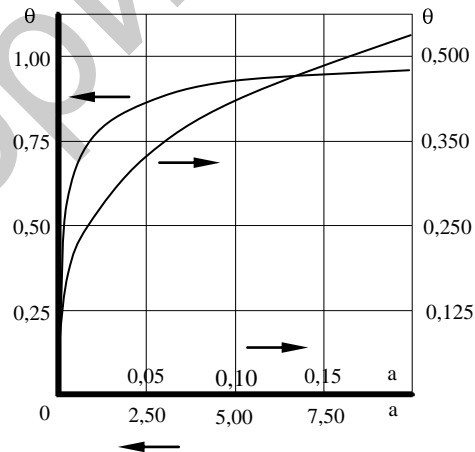


Рис. 2. Зависимость относительной скорости  $\theta$  вращения кольца воды от комплекса «а»

Как видно из рис. 1, при относительной толщине кольца  $x = 0,4$  скорость кольца при учете трения почти в два раза меньше, чем без его учета. Как можно видеть на рис. 2, при стремлении комплекса «а» к своим максимальным значениям величина  $\theta$  стремится к 1,0. Расчеты, результаты которых приведены на рис. 1, проводили для камеры смешения высотой  $h_0 = 0,08$  м, толщиной слоя воды  $\sigma = 1-10$  см и радиусом  $R_1 = 0,265$  м. Плотность воды  $\rho_v = 1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $\varepsilon = 0,02$ .

Если предположить, что закон распределения скорости по радиусу кольца  $\omega_{ki} \cdot r = \text{const}$  (режим течения потенциальный), то текущая скорость кольца, выраженная через скорость на внутренней границе кольца (или скорость редуцированного пара), равна

$$\omega_{ki} = \frac{\omega_p (R_2 - \delta)}{r} = \frac{\omega_p R_2 (1 - x)}{r}.$$

Мысленно разбив кольцо воды на слои толщиной  $dr$ , для каждого слоя имеем  $dm_k = \rho S dr$ . Слагаемое баланса кинетической энергии, учитывающее потери на трение, в этом случае равно

$$\frac{\Delta t}{2} \int_{R_3}^{R_2} \zeta \rho \frac{S}{2\pi R} (R_2 - \delta)^3 \omega_p^3 \frac{dr}{r^3} = B \omega_p^3 \frac{\Delta t}{2}.$$

Скорость  $\omega_p$  можно определить из следующего уравнения:

$$\omega_p^3 - \omega_p^2 G_p \varphi - G \omega_p^2 \varphi = 0,$$

где

$$\varphi = \frac{1}{B} = \frac{2\pi R_2^2}{\zeta \rho \delta h_0 (1 - x)}.$$

Теперь рассмотрим некоторые практические применения проведенных исследований.

**Вихревой испаритель (парогенератор).** Аппарат вихревого типа имеет специально профилированную камеру – испаритель [11–13]. В нее поступает жидкость под давлением. В центре устройства из-за падения давления жидкость кипит. Образующийся сухой насыщенный пар отводится в пароотводящий патрубок. Устройство предназначено для генерирования сухого насыщенного пара из предварительно нагретой жидкости путем понижения давления за счет ее закручивания и уменьшения радиуса закрутки. При этом обеспечивается стабильная граница раздела жидкой и паровой фаз.

Особенность вихревого парогенератора – внутренняя сепарация влаги в испарительной камере. Средняя скорость выхода пара с зеркала испарения вихревого испарителя достигает нескольких десятков метров в секунду, поэтому его удельная паровая нагрузка при подаче в него жидкости с температурой 140 °С и давлением 0,4–0,5 МПа составляет 5 кг пара с квадратного метра зеркала испарения в секунду.

Экспериментальные исследования модели вихревого испарителя показали, что его паропроизводительность в 25 раз больше, чем в традиционных испарителях. Рабочие характеристики вихревого испарителя устойчивы, он легко запускается, поддается автоматическому регулированию, быстро выходит на режим и устойчиво работает при любом расположении в пространстве. Конструкция вихревого испарителя проста, он компактен,



обладает небольшой металлоемкостью при большой паропроизводительности.

Он может найти применение как выпарной аппарат для очистки жидких радиоактивных отходов и опреснения морской воды. Как показали предварительные исследования, использование процесса объемного испарения при одновременной центробежной сепарации позволит достичь коэффициента очистки  $10^7$ – $10^8$ , коэффициента концентрации  $10^2$ – $10^3$ , увеличить производительность на 30 % и снизить себестоимость получения чистой жидкости (питьевой воды) в 10 раз.

Вихревые испарители могут найти применение в качестве устройств для очистки сред от разных примесей и солей, так как эти вещества остаются в прокачиваемой через парогенератор жидкости, для дегазации жидкостей, поскольку газ уходит вместе с образующимся паром, для разгонки нефти, получения чистых металлов, для очистки отработанных масел и во многих других областях.

**Вихревая сушилка** [21] позволяет высушивать рассолы из различных веществ.

Особенность этой сушилки – возможность избежать отложений на теплообменных поверхностях из-за проведения процесса сушки с закритическими скоростями (при которых не происходит образования накипи). Она может быть использована для сушки отходов различных вредных производств (например, гальванического) с последующим использованием сухого остатка как сырья для промышленности. Сушилка отличается малыми массогабаритными характеристиками.

**Теплообменная труба**, в которой создается внутреннее вращение текущей среды в плоскости, проходящей через ее ось [20]. Является элементом различных теплообменных устройств, например конденсаторов. Особенность – возможность избежать отложений из-за внутренних кольцевых сужений трубы специального профиля. Их создавали на токарном станке рифленным роликом специального профиля.

**Устройство, в котором находятся движущиеся жидкости и газы.** Аппарат, применяемый в различных отраслях промышленности, в быту, сельском хозяйстве [11–13] в качестве:

- фильтра для очистки воздуха от пыли с одновременным увлажнением, охлаждением и дезинфекцией;
- концентратора сточных вод;
- концентратора фруктовых, овощных и ягодных соков, молока и т. д. за счет выпаривания воды;
- газоочистителя от различных примесей (хлора, фтора, аммиака и т. д.);
- деаэрата.

**Устройства, в которых находятся подвижные (вращающиеся) частицы, шары или микротвэлы** (например, в вихревом ядерном реакторе). Применяются в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства [20] в качестве:

- сушильного агрегата для подсушки сыпучих материалов, например зерна;
- каталитического реактора;
- опреснителя морской воды;

- концентратора примесей в сточных водах;
- энергетического и транспортного ядерного реактора с шаровыми микротрещинами;
- сепаратора для классификации полифракционного материала.

**Вихревые камеры для проведения тепло-, массообменных и химических процессов** [20, 21, 32]. За счет создания специальным образом спрофилированной камеры смешения можно добиться интенсификации теплообмена и химических процессов без накипеобразования на стенках устройства. Для отвода образующихся газообразных компонентов предусмотрен специальный патрубок. Жидкость не попадает в газоотводный патрубок благодаря специальному профилю камеры и центральному местоположению этого патрубка.

**Устройство, в котором используется неподвижная засыпка** [33, 34]. Аппарат может применяться в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства в качестве:

- агрегата для подсушки сыпучих материалов, например зерна, песка и т. д.;
- фильтра для очистки жидкостей и газов от пыли и грязи;
- влаго-, маслоотделителя для очистки газовых сред;
- каталитического реактора в химической промышленности;
- дожигателя непредельных углеводородов и окиси углерода в автомобильной промышленности;
- тепловыделяющих сборок самых современных транспортных и энергетических ядерных реакторов с шаровыми микротрещинами, в частности для сжигания оружейного плутония с высокой эффективностью.

Аппарат включает корпус, внутри которого коаксиально расположены наружный и внутренний пористые цилиндры. Сыпучий материал или набивка размещаются между этими пористыми цилиндрами.

Поток рабочего тела входит в кольцевой зазор между корпусом и наружным пористым цилиндром и, двигаясь в кольцевом зазоре в осевом направлении, фильтруется через поры наружного цилиндра в радиальном направлении, проходит далее через засыпку (набивку). В соответствии с назначением конкретного аппарата рабочее тело или очищается, или нагревается, или образует новые химические соединения, или отбирает влагу от сыпучего вещества. Далее через поры внутреннего цилиндра поток рабочего тела попадает в приосевую зону, разворачивается в осевом направлении и уходит из аппарата. Как вариант, движение рабочего тела можно осуществить, наоборот, от центра аппарата через засыпку в кольцевой зазор у корпуса.

Разработки обеспечивают:

- заданную (например, равномерную) раздачу потока рабочего тела по высоте и диаметру пористых цилиндров;
- термогидравлическую устойчивость течения рабочего тела в засыпке;
- сохранение заданного профиля скорости фильтрации в переменных и переходных режимах течения;
- выполнение специфических требований каждого аппарата в соответствии с его конкретным назначением.

**Заградительное охлаждение энергоблока** с теплофикационной турбиной Т-250/300-240 [16, 17]. При работе паровых турбин возможны различные режимы, в том числе и с малыми расходами пара (через всю турбину при режиме холостого хода, а также у теплофикационных турбин через цилиндр низкого давления (ЦНД) при больших отборах пара на теплофикацию).

При очень малых расходах пара через ЦНД этот цилиндр не вырабатывает мощность, а потребляет ее, т. е. работает как вентилятор. Какой-то минимальный пропуск пара через всю турбину при холостом ходе или через ЦНД при больших теплофикационных отборах должен быть для охлаждения проточной части, иначе из-за выделения мощности при вентиляторном режиме проточная часть турбины перегреется более допустимого уровня, лопатки и сопловой аппарат будут повреждены.

При малорасходных режимах в ЦНД наблюдается следующая картина: пар отбрасывается лопатками к периферии и оттуда идет в конденсатор. При этом в центре ЦНД, вблизи вала ротора, создается разрежение, и туда из конденсатора засасывается пароводяная смесь.

Капли и пленка влаги из конденсатора обладают достаточной кинетической энергией (массой и скоростью) для разрушения лопаток турбины, стоящих на пути пароводяного потока из конденсатора. Цель изобретения состоит в использовании для охлаждения ЦНД этого потока пароводяной смеси из конденсатора, но после измельчения капель до размеров пыли (порядка нескольких микрон), не вызывающей эрозию лопаток.

**Защита проточной части цилиндра среднего давления от эрозии.** Изобретение [18] относится к области энергетического машиностроения и может быть использовано при конструировании и модернизации паровых турбин, работающих с промежуточным перегревом пара.

Предназначено для уменьшения эрозии проточной части турбин, внедрено на Минской ТЭЦ-4 на трех энергоблоках (№ 4, 5, 6) с турбиной Т-250/300-240. Значительно уменьшилась эрозия проточной части турбины. Экономический эффект от внедрения составляет около 2000 т у. т. в год на одном энергоблоке.

**Повышение эффективности работы энергоблока № 5 МТЭЦ-4 с турбиной Т-250/300-240 благодаря применению вихревого пароохладителя** [19]. Во время проведения капитального ремонта энергоблока № 5 МТЭЦ-4 в 2000 г. на трубопроводе подачи пара на уплотнения турбоагрегата Т-250/300-240 был установлен вихревой пароохладитель, разработанный авторами на основании нового способа – вихревого охлаждения пара [9, 15]. Этот пароохладитель, позволяющий быстро получать охлажденный пар с нужной температурой, точно ее регулировать и не дающий каплям охлаждающей воды выходить из него при нормальном режиме работы, повышает надежность работы турбины, особенно в переменных режимах и при пуске. Штатная система не позволяла быстро, надежно и точно регулировать температуру пара, а главное, не гарантировала исключение заброса воды в уплотнения турбины, что приводило к термошокам металла в них, не исключало попадание воды в проточную часть турбины.

При пуске турбин из холодного и неостывшего состояний роторы из-за значительно меньшей массы и более интенсивного взаимодействия с паром

нагреваются быстрее цилиндров и через 4–5 ч величина их относительного расширения доходит до предельно допустимых значений.

Снижение величины расхода топлива при пусках энергоблока из холодного состояния с применением вихревого пароохладителя на трубопроводе подачи пара на уплотнения обусловлено уменьшением времени пусковых операций до включения турбогенератора в сеть в среднем на 5 ч. Экономия топлива при этом составляет около 60 т у. т. за один пуск. Количество пусков из холодного и неостывшего состояний в среднем за год – 10–15. Таким образом, экономия топлива при использовании вихревого пароохладителя – около 750 т у. т. в год (если блок все время в работе, а не простаивает), что при цене 100 дол. за 1 т у. т. составляет 75000 дол. в год. Кроме того, возрастает надежность работы энергоблока и уменьшаются количество и стоимость ремонтов.

#### ВЫВОДЫ

1. Разработан и испытан класс устройств, которые возникли в результате фундаментальных исследований многофазных течений в центробежных силовых полях, понимания сущности происходящих в них процессов и оптимизации их математического описания.

2. Впервые предложен эффективный способ понижения давления и температуры пара в вихревых редуционно-охладительных и пароохладительных устройствах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р о б о ж е в, А. В. Редуционно-охладительные установки для тепловых и атомных электростанций / А. В. Робожев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 219 с.
2. С п о с о б обогащения газов парами жидкости и получения туманов: пат. 2.080.189 Рос. Федерация / В. П. Кашеев [и др.]. – 1992.
3. Р е д у к ц и о н н о-охладительное устройство: а. с. 1.110.990 СССР / В. П. Кашеев [и др.]. – 1983.
4. Р е д у к ц и о н н о-охладительное устройство: а. с. 1.266.288 СССР / В. П. Кашеев [и др.]. – 1985.
5. Д р о с с е л ь н о-охладительное устройство: а. с. 1.263.965 СССР / В. П. Кашеев [и др.]. – 1985.
6. Р е д у к ц и о н н о-охладительное устройство: а. с. 1.318.763 СССР / В. П. Кашеев [и др.]. – 1986.
7. С п о с о б запуска устройства для охлаждения перегретого пара: а. с. 1.370.365 СССР / В. П. Кашеев [и др.]. – 1986.
8. Р е д у к ц и о н н о-охладительное устройство: а. с. 1.467.310 СССР / В. П. Кашеев [и др.]. – 1988.
9. П а р о о х л а д и т е л ь: а. с. 1.471.735 СССР / В. П. Кашеев [и др.]. – 1988.
10. С п о с о б охлаждения и редуцирования пара : а.с. № 1.715.011 СССР / В. П. Кашеев [и др.]. – 1990.
11. И с п а р и т е л ь: а. с. 1.726.891 СССР / В. А. Левадный [и др.]. – 1991.
12. П а р о г е н е р и р у ю щ е е устройство: а. с. № 1.200.824 СССР / В. А. Левадный [и др.]. – 1984.
13. П а р о г е н е р и р у ю щ е е устройство: а. с. 1.268.868 СССР / В. А. Левадный [и др.]. – 1986.
14. С п о с о б охлаждения пара: а. с. 1.759.099 СССР / В. П. Кашеев [и др.]. – 1989.
15. С п о с о б охлаждения пара: пат. 4.230 Респ. Беларусь / В. П. Кашеев [и др.]. – 2001.
16. С п о с о б заградительного охлаждения выхлопной части цилиндра низкого давления: пат. 8.094 Респ. Беларусь / В. А. Хаймов, Е. О. Воронов, В. П. Кашеев, В. Н. Сорокин; опубл. 21.10.02. – 2002.

17. Выхлопной патрубок паровых турбин: пат. 2.999 Респ. Беларусь / В. П. Кашеев [и др.]. – 2006.
18. Цилиндр среднего давления паровой турбины: пат. 4.203 Респ. Беларусь / В. П. Кашеев [и др.]. – 2007.
19. Способ работы паротурбинной установки в нестационарном режиме: пат. 8.843 Респ. Беларусь / В. П. Кашеев [и др.]. – 2006.
20. Теплообменная труба: а. с. 1.211.585 СССР / В. П. Кашеев [и др.]. – 1985.
21. Способ интенсификации теплообмена: а. с. 1.302.131 СССР / В. Н. Сорокин [и др.]. – 1986.
22. Kastschejew, V. P. Modernisierung des Dampfleitungssystem / V. P. Kastschejew, E. O. Voronov, V. N. Sorokin // XXXV Kraftwerkstechnisches Kolloquim. – Dresden, 2003.
23. Schütz kühl in g am ND-Gehäuse-Austritt von Dampfturbinen / V. P. Kastschejew [et al.] // XXXV Kraftwerkstechnisches Kolloquim. – Dresden, 2003.
24. Kastschejew, V. P. Reduzier- u. Kuehlstationen und Dampfkuehler auf Wirbelprinzip fuer Kernkraftwerke / V. P. Kastschejew, V. A. Gashenko, K. E. Kastschejewa // XXII Kraftwerkstechnisches Kolloquim. – Dresden, 1990.
25. Kastschejew, V. P. Effektivitätssteigerung von HKW durch rekonstruktion des Speisewasservorwarm-systems der Turbinenanlage / V. P. Kastschejew, K. E. Kastschejewa // XXVI Kraftwerkstechnisches Kolloquim. – Dresden, 1994.
26. Kastschejew, V. P. Verfahren zur Messung der Damhffuchtigkeit und Flues-sigktitsmenge in stroemendem Dampf oder Dampf-Wasser-Gemischen // V. P. Kastschejew, K. E. Kastschejewa // XXVIII Kraftwerkstechnisches Kolloquim. – Dresden, 1996.
27. Левадный, В. А. Устройство для понижения давления и температуры пара / В. А. Левадный, В. Н. Сорокин, В. П. Кашеев // Труды международного семинара по конверсионной технике. – Минск, 1999. – Ч. 1. – С. 312–315.
28. Levadny, V. A. The apparatus for lowering pressure and temperature of steam / V. A. Levadny, V. N. Sorokin, V. P. Kascheev // Proceedings of the International Seminar «Conversion of Scientific Research in Belarus within the Framework of ISTC Activity». Part 1. Minsk, May 17–22, 1999. – P. 298–300.
29. Делайе, Дж. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике: пер. с англ. / Дж. Делайе, М. Гио, М. Ритмюллер. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 424 с.
30. Исследование нестационарных режимов работы паросбросного оборудования энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 и разработка технических предложений по его усовершенствованию: отчет о НИР / БНТУ; рук. темы В. П. Кашеев. – Минск, 1987. – № ГР 01.86.0 124789.
31. Справочник по теплогидравлическим расчетам. Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы / П. Л. Кириллов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
32. Вихревой аппарат для проведения теплообменных процессов в поле центробежных сил: а. с. 965.441 СССР / В. П. Кашеев [и др.]. – 1979.
33. Кашеев, В. П. О гидравлическом сопротивлении слоя шаров / В. П. Кашеев, В. Н. Сорокин, А. В. Лебедев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1984. – № 8.
34. Кашеев, В. П. Исследование теплообмена между одиночным тепловыделяющим шаром и струей воздуха / В. П. Кашеев, В. Н. Сорокин, А. В. Лебедев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1985. – № 9.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 13.03.2012

УДК 622.276.279.691.4

## **ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ОАО «БЕЛТРАНСГАЗ»**

**МАЙОРОВ В. В.**

*ОАО «Белтрансгаз»*