

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

5. При глубине разгрузки менее 50 % $N_{\text{ном}}$ вариант с электродотами уступает варианту с баками-аккумуляторами. В промежутке 50–100 % $N_{\text{ном}}$ 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.¹⁾, инж. ВОРОНОВ Е. О.²⁾,
магистр техн. наук КАЩЕЕВА О. В.³⁾, канд. техн. наук ХАИМОВ В. А.⁴⁾,
доктора техн. наук ГАШЕНКО В. А.⁵⁾, СОРОКИН В. Н., инж. УЛАСЮК Н. Н.¹⁾,
докт. техн. наук, проф. КУЛАКОВ Г. Т.¹⁾, студ. КЛИМЕНКОВА О. Л.¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет,

²⁾РУП «Белэнерго»,

³⁾Университет Штутгарта (IGE),

⁴⁾ЗАО «ЭНЕРГОСЕРВИС»,

⁵⁾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. При этом 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; ρ – плотность; p – давление; ν – 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, φ, z) , а для сферической капли жидкости – в сферической системе координат (r, φ, θ) . 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 φ , 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 φ и θ . 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 ψ_k , \bar{I}_k , ϕ_k , ϕ_i для каждого локального мгновенного закона сохранения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения используемых в уравнении (4) символов

Закон сохранения	Символ			
	ψ_k	\bar{I}_k	ϕ_k	ϕ_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	$\frac{1}{T_k} q_k$	$\frac{1}{q_k} \Delta_k$	Δ_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 Δt в проекции на плоскость вращения кольца. За это время в камеру смешения со скоростью ω вошла масса $G\Delta t$ редуцируемого пара, со скоростью ω_b вошла масса $G_b\Delta t$ охлаждающей воды, а со скоростью ω_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 ζ – 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 Δt 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 Δt : $M_k = m_k n$. 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 θ , равную отношению скорости вращения ω_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 ω_k или θ можно найти, например, по формулам Кардано.

Для определения коэффициента сопротивления трению ζ 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, $Re > Re_{гр}$)

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

где dr – гидравлический диаметр; Δ – 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 ν – коэффициент кинематической вязкости и $dr = \frac{4h_0\delta}{h_0 + 2\delta}$.

Используя уравнение (7), были определены относительные скорости θ 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.

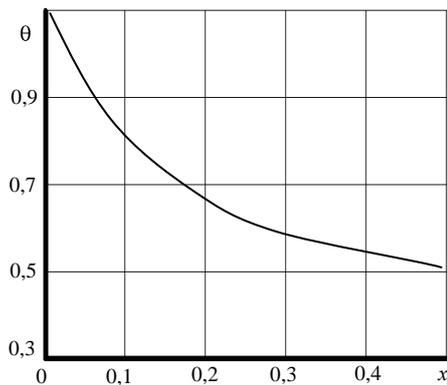


Рис. 1. Зависимость относительной скорости θ вращения кольца воды от его относительной толщины x

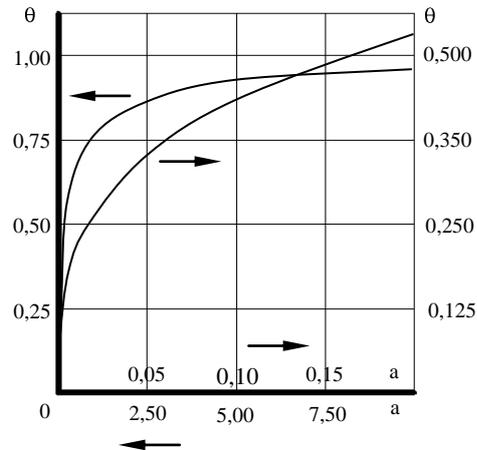


Рис. 2. Зависимость относительной скорости θ вращения кольца воды от комплекса «а»

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 θ 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/м³, $\varepsilon = 0,02$.

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 ω_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 микротвэлами;

- 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 микротвэлами, 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 обеспечат:

- 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. Schützking 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 Damhfeuchtigkeit und Fluesigktitsmenge 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»