

УДК 621.165

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ И СЕПАРАЦИИ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ КАПЕЛЬНЫХ ПОТОКОВ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИКЛОНАХ С БОКОВЫМ ПОДВОДОМ ВЛАЖНОГО ПАРА ИЛИ ВОЗДУХА

Лагерева Э.А.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского

Представлена методика расчета коэффициента сепарации полидисперсной капельной влаги из потока влажного пара или воздуха в вертикальном циклоне с боковым тангенциальным входом потока рабочего тела, а также гистограммы распределения по размерам не осевших капель и эпюры распределения по внутренней поверхности стенки циклона массового расхода осевшей жидкости. Она включает газодинамическую модель движения газовой и жидкой фаз рабочего тела внутри циклона и подход, реализующий идею пространственной и фракционной дискретизации процесса сепарации. На основе расчетов кинематики капельной влаги конкретных циклонов показана целесообразность совершенствования принятой системы влагоудаления, связанного с выполнением промежуточных влагоотводящих устройств, рациональным их размещением на поверхности обечайки и заданием оптимальных конструктивных размеров.

Ключевые слова: *циклон, моделирование, газодинамическая модель, кинематика, сепарация, капельная влага, промежуточное влагоотводящее устройство.*

DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2016-02-04-99-109>

Вертикальные циклоны с боковым тангенциальным подводом влажного пара или воздуха, выходом газовой фазы в верхней части корпуса и удалением уловленной капельной влаги через нижнюю часть конструктивно являются одним из наиболее простых типов сепарационных устройств. В промышленной и коммунальной теплоэнергетике различные конструктивные разновидности этих сепараторов нашли применение [1-4], в частности, в качестве внутрибаранных и выносных циклонов паровых котлов ТЭС и парогенераторов АЭС, батарейных сепараторов влажного пара. К настоящему времени выполнен значительный объем теоретических и экспериментальных исследований основных технических характеристик вертикальных циклонов – эффективности сепарации, гидравлического сопротивления, допустимых паропроизводительности и осевой скорости подъема пара и воздуха и др. С их помощью и на основе практического опыта были сформулированы рекомендации по проектированию в зависимости от ожидаемого режима работы циклонов, а также получены критериальные соотношения для оценки коэффициента сепарации в зависимости от конструктивных размеров и параметров двухфазного рабочего тела [1, 2]. Было установлено, что эффективность сепарации имеет экстремальный характер изменения в зависимости от величины отношения тангенциальной скорости газового потока на входе в циклон u и осевой скорости подъема пара w_0 . Оптимальное значение $u/w_0 = 10...20$ по данным [2], причем допустимые величины w_0 для сепараторов паровых котлов составляют $[w_0] = 0,3...1,3$ м/с при давлении пара 1...11 МПа.

Конструкция вертикальных циклонов предусматривает удаление отсепарированной влаги в нижней части его водяного объема путем самопроизвольного стекания жидкой пленки, образующейся при центробежном отделении капель из закрученного потока рабочего тела в результате проявления инерционного эффекта, вдоль внутренней стенки цилиндрической обечайки под действием силы тяжести. Для повышения эффективности сепарации иногда предусматриваются влагоотводящие щели, располагаемые в верхней части парового объема циклона в непосредственной близости от пароотводящей трубы, для удаления той части жидкой пленки, которая может двигаться вверх под действием силы внутреннего трения на границе раздела фаз. Анализ применяемой системы влагоудаления показывает ее недостаточную развитость, так как на всем достаточно протяженном пути движения пленки от подводящего патрубка до нижней или верхней части сепаратора (вдоль оси циклона его относительная протяженность составляет 1...3 диаметра обечайки D_0 , а полная может достигать до

(10...20) D_0 и более) отсутствуют промежуточные устройства влагоудаления и, таким образом, отсутствует возможность эффективного воздействия на протекающие процессы вторичного массообмена между жидкой и газовой фазами. Следует ожидать, что эти процессы достаточно интенсивны. Это связано с отражением и разбрызгивающим действием оседающих первичных капель [5], с вероятностью формирования по мере перемещения к месту удаления пленок критической толщины [6] и с трехмерным характером поля скоростей паровой фазы внутри циклона – наличием обширной вихревой зоны у противоположной относительно подводящего патрубка стенки и возможностью возвратного движения пара в центральной части циклона вследствие радиальной неравномерности эпюры давления по поперечному сечению обечайки. Вторичные срывные процессы с поверхности жидкой пленки, подъем капель пара и вынос их в паропроводящую трубку интенсифицируются с увеличением осевой скорости w_0 , т.е. при уменьшении отношения $u/w_0 < 5$ они настолько снижают сепарационную способность вертикальных циклонов, что делают невозможным их эффективную работу [2].

Таким образом, недостаточная развитость традиционно применяемой системы влагоудаления во многом обуславливает присущие данному типу сепараторов недостатки:

- сравнительно невысокие значения допустимой паропроизводительности (объемного расхода влажного пара);
- повышенные массогабаритные показатели.

Улучшение названных технических характеристик путем снижения допустимых значений отношения $u/w_0 < 10...20$ при сохранении высокого значения коэффициента сепарации является важным условием совершенствования конструкции вертикальных циклонов.

Данная задача должна решаться в направлении совершенствования системы влагоудаления: применении промежуточных влагоотводящих устройств, рациональном их размещении на поверхности обечайки и задании оптимальных конструктивных размеров. В свою очередь, решение совокупности названных частных задач базируется на результатах моделирования движения полидисперсных потоков капельной влаги в поле скоростей газовой фазы внутри циклона, построении эпюр распределения по внутренней поверхности обечайки расхода осевшей жидкости, прогнозировании направления ее дальнейшего перемещения и изменения толщины жидкой пленки [7]. Разработке возможных подходов к моделированию движения влаги в вертикальных циклонах и посвящена данная работа.

На рис. 1 приведена конструкция исследуемых сепараторов с обозначением характерных геометрических размеров.

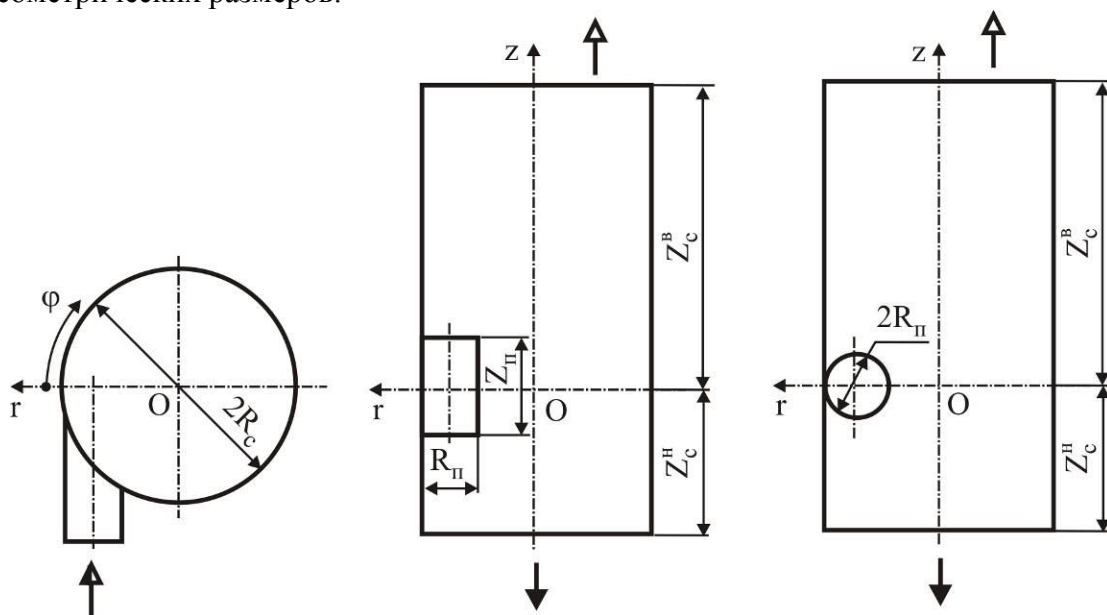


Рис. 1. Конструкция вертикальных циклонов с боковым тангенциальным подводом влажного пара или воздуха

В основе моделирования кинематики каплей влаги лежит подход, реализующий идею пространственной и фракционной дискретизации процесса [8, 9].

Под пространственной дискретизацией понимается разделение капельного потока на ряд групп в зависимости от места их входа вовнутрь циклона с последующим отдельным анализом движения капель каждой группы и оценкой ее вклада в формирование пленки жидкости. Для этого проекция выходного сечения подводящего патрубка на плоскость xOz разбивается на $N = n_i n_j$ подобластей S_{ij} , каждая из которых характеризуется четырьмя угловыми точками $M_{ij}^{(1)} \dots M_{ij}^{(4)}$ и центральной точкой M_{ij} (рис. 2). В случае патрубка прямоугольного поперечного сечения подобласть S_{ij} также является прямоугольной, причем n_i - число рядов S_{ij} по ширине патрубка, а n_j - число слоев S_{ij} по его высоте. Координаты центральных точек M_{ij} в цилиндрической системе координат $r\varphi z$:

$$r_{ij} = R_0 - (i - 0,5)\Delta R; \quad \varphi_{ij} = 0; \quad z_{ij} = Z_c + (j - 0,5)\Delta Z.$$

В случае патрубка круглого поперечного сечения подобласть S_{ij} является кольцевым сектором, причем n_i - число рядов S_{ij} в окружном направлении, а n_j - число слоев S_{ij} в радиальном направлении. Координаты центральных точек M_{ij} в цилиндрической системе координат $r\varphi z$:

$$r_{ij} = [R_n - (j - 0,5)\Delta R] \cos[(i - 0,5)\Delta \psi]; \quad \varphi_{ij} = 0; \quad z_{ij} = [R_n - (j - 0,5)\Delta R] \sin[(i - 0,5)\Delta \psi].$$

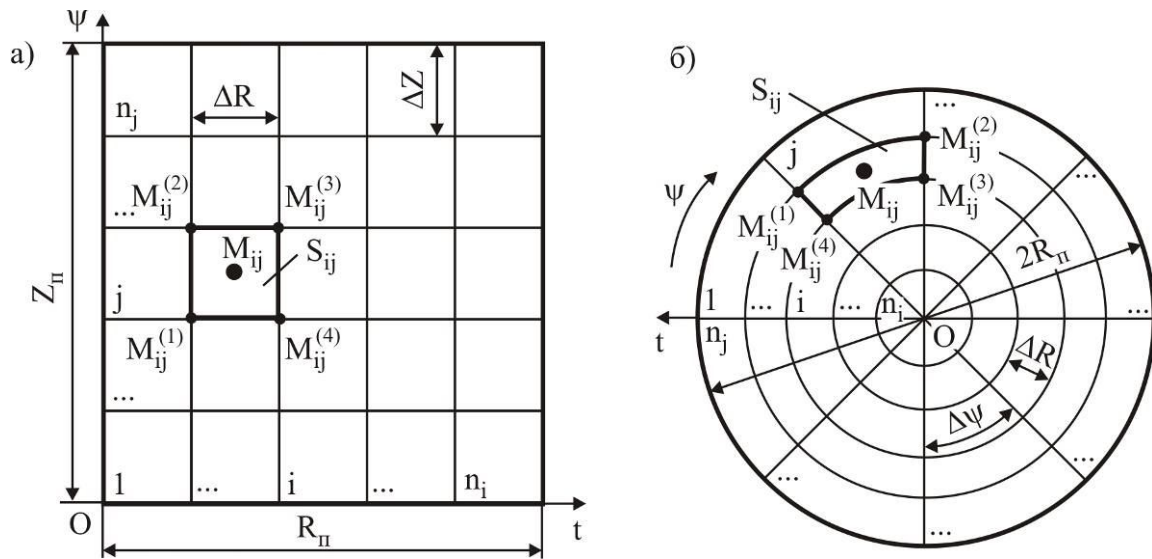


Рис. 2. Схемы пространственной дискретизации сечения подводящего патрубка: а - прямоугольного поперечного сечения; б - круглого поперечного сечения

Движение паровой фазы на входе в циклон приближенно является одномерным. Скорость пара переменна в пределах поперечного сечения подводящего патрубка $C = C(t, \psi)$ [10], вследствие чего массовый расход рабочего тела через произвольную подобласть S_{ij} поперечного сечения приближенно равен

$$g_{ij} = \rho C(t_{ij}, \psi_{ij}) F_{ij},$$

где ρ - плотность влажного пара; t_{ij}, ψ_{ij} - координаты центральной точки M_{ij} подобласти S_{ij} в системе координат, связанной с поперечным сечением подводящего патрубка (рис.2); F_{ij} - площадь подобласти S_{ij} .

Локальная степень влажности $y(t, \psi)$ в пределах поперечного сечения подводящего патрубка существенно неравномерна. Согласно данным [11], для перепускных ресиверов большого диаметра влажнопаровых турбин АЭС примерно 30...50 % влаги концентрируется в пристеночной зоне толщиной менее 5 % диаметра поперечного сечения. Вид функции $y(t, \psi)$ учитывает неоднородность заполнения влагой сечения патрубка в радиальном t и окружном ψ направлениях, возникающую при наличии в подводящем участке патрубка криволинейных участков, ответвлений, отборов рабочего тела и других местных сопротивлений. Для функции $y(t, \psi)$ справедливо соотношение:

- подводящий патрубок прямоугольного сечения

$$\int_0^{R_n} \int_0^{Z_n} y(t, \psi) dt d\psi = R_n Z_n y_0;$$

- подводящий патрубок круглого сечения

$$\int_0^{R_n} \int_0^{2\pi} y(t, \psi) dt d\psi = \pi R_n^2 Z_n y_0,$$

где y_0 - средняя степень влажности рабочего тела на входе в циклон.

Таким образом, через подобласть S_{ij} поперечного сечения подводящего патрубка вовнутрь циклона поступает массовый расход капельной влаги

$$g'_{ij} = y(t_{ij}, \psi_{ij}) g_{ij}.$$

Под фракционной дискретизацией понимается разделение полидисперсного капельного потока каждой из групп на ряд фракций в зависимости от их радиуса r_k с последующим отдельным анализом дальнейшего движения капель каждой фракции и оценки ее вклада в формирование пленки жидкости. Для этого весь диапазон размеров капель, проходящих через подобласть S_{ij} поперечного сечения подводящего патрубка, $r_k \in [0; r_{\max, ij}]$ разбивается на K фракций одинаковой ширины $\Delta r_{ij} = r_{\max, ij} / K$. К произвольной ν -й фракции относятся капели размера

$$r \in [(\nu - 1)\Delta r_{ij}; \nu\Delta r_{ij}]$$

со среднефракционным радиусом $r_{ij, \nu} = (\nu - 0,5)\Delta r_{ij}$.

В первом приближении для характеристики распределения массы капель по размерам рекомендуется использование нормальной функции Гаусса [6]:

$$f_4(r_k) = \frac{m(r_k)}{m(\bar{r}_k)} = \exp \left[-\pi \left(\frac{r_k}{\bar{r}_k} - 1 \right)^2 \right].$$

Учитывая свойства нормального распределения [12], распределение расхода капельной влаги в каждой подобласти g'_{ij} также следует считать нормальным со средним значением радиуса капель $\bar{r}_{kij} = 0,5r_{\max, ij}$. Расход капель ν -й фракции, прошедшей через подобласть S_{ij} , составляет $r_{ij, \nu} + \Delta r_{ij} / 2$:

$$g'_{ij, \nu} = g'_{ij} \left\{ \int_{r_{\max, ij}}^{r_{ij, \nu} + \Delta r_{ij} / 2} \exp \left[-\pi \left(2 \frac{r_k}{r_{\max, ij}} - 1 \right)^2 \right] dr_k \right\} / \left\{ \int_0^{r_{\max, ij}} \exp \left[-\pi \left(2 \frac{r_k}{r_{\max, ij}} - 1 \right)^2 \right] dr_k \right\}.$$

Таким образом, весь поток капельной влаги на входе в циклон разделяется на $n_i n_j$ отдельных групп и фракций, движение которых подлежит отдельному моделированию. Представление о движении и осаждении всех капель ν -й фракции ij -й группы дает движение капели среднефракционного радиуса $r_{ij, \nu}$, прошедшей через центральную точку M_{ij} . Очевидно,

с уменьшением дискретности разбиения (т.е. с увеличением n_i и n_j) результаты расчета количества осевшей влаги на внутренней поверхности циклона будут приближаться к действительному значению. Это подтверждается данными, приведенными на рис. 3 и характеризующими изменение величины коэффициента осаждения в зависимости от числа подобластей S_{ij} . При проведении расчетов в качестве примера использовался сепаратор, предназначенный для эксплуатации при номинальном давлении 0,8 МПа, массовом расходе рабочего тела $G = 0,6$ и $1,2$ кг/с и степени влажности $y_0 = 0,8$ в составе системы подготовки геотермального пара турбин ГеоТЭС. Конструктивные размеры данного циклона: $R_n = 0,03$ и $0,06$ м; $Z_n = 0,15$ м; $R_0 = 0,15$ м; $Z_c^e = 1,15$ м; $Z_c^h = 0,5$ м; $\alpha = \beta = 0$. Видно, что погрешность расчета η_0 , связанная с дискретностью представления процесса, при $n_i n_j > 4 \dots 9$ оказывается практически незначимой.

Кинематика каплей v -й фракции ij -й группы (траектория и скорость) характеризуются системой дифференциальных уравнений движения сферической жидкой частицы под действием преимущественно сил инерции, тяжести и аэродинамического сопротивления со стороны пара [6, 7]. В цилиндрической системе координат циклона $r\varphi z$

$$\begin{aligned} dC_r' / d\tau &= C_\varphi'^2 / r - K_1 C_x v C_r'; \\ dC_\varphi' / d\tau &= -C_r' C_\varphi' / r + K_1 C_x v (C_\varphi - C_\varphi'); \\ dC_z' / d\tau &= K_1 C_x v (C_z - C_z') - g; \end{aligned}$$

где $K_1 = 0,375(\rho / \rho') / r_{ij,k}$; C_x - коэффициент аэродинамического сопротивления, являющийся функцией числа Рейнольдса Re капли $r_{ij,v}$ [13]; $v = |C - C'|$ - модуль разности скоростей паровой и жидкой фаз; g - ускорение свободного падения; r, φ, z - индексы обозначают проекции скорости капли на соответствующие оси цилиндрической системы координат.

Начальные условия (в точке M_{ij}):

$$\begin{aligned} r(0) &= r_{ij}; \quad \varphi(0) = \varphi_{ij}; \quad z(0) = z_{ij}; \\ C_r'(0) &= \Theta(r_{ij,v}) C(t_{ij}, \psi_{ij}) \sin \alpha; \\ C_\varphi'(0) &= \Theta(r_{ij,v}) C(t_{ij}, \psi_{ij}) \cos \alpha \cos \beta; \\ C_z'(0) &= \Theta(r_{ij,v}) C(t_{ij}, \psi_{ij}) \sin \beta; \end{aligned}$$

где $\Theta(r_{ij,v})$ - коэффициент скольжения для капли, зависящий от ее радиуса и параметров рабочего тела [13].

Согласно [2], в первом приближении поле скоростей паровой фазы внутри циклона сравнительно малого диаметра можно определять на основе статистического закона скоростей:

$$\omega = \frac{u}{R} = const,$$

где ω - угловая скорость вращения газа; u - линейная скорость газа на радиусе R .

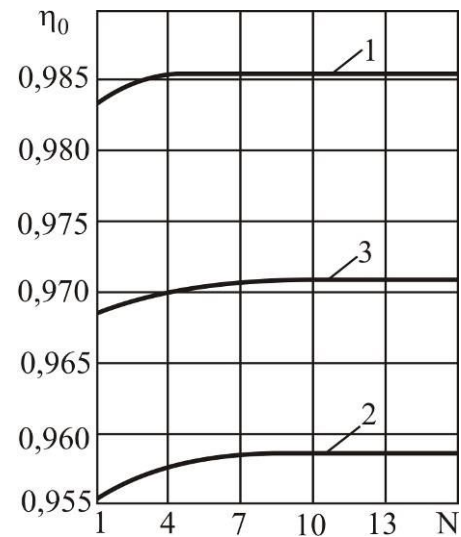


Рис. 3. Влияние дискретности разбиения подводящего патрубка на оценку η_0 (при $n_i = n_j$):

- 1 - $R_n = 0,03$ м, $G = 0,6$ кг/с, $u / w_0 = 16$;
- 2 - $R_n = 0,06$ м, $G = 0,6$ кг/с, $u / w_0 = 8$;
- 3 - $R_n = 0,06$ м, $G = 1,2$ кг/с, $u / w_0 = 16$

Тогда в произвольной точке $N(r, \varphi, z)$ циклона проекции скорости пара на оси цилиндрической системы координат

$$\begin{aligned} C_r &= 0; \quad C_z = G / \pi \rho R_0^2; \\ C_\varphi &= rG / \pi \rho R_n Z_n (R_0 - R_n / 2) - \text{прямоугольный патрубок}; \\ C_\varphi &= rG / \pi \rho R_n^2 (R_0 - R_n) - \text{круглый патрубок}. \end{aligned}$$

Система дифференциальных уравнений движения интегрируется с помощью численного метода Рунге-Кутты 4-го порядка. Это позволяет для ряда дискретных моментов времени $\tau_k = k\Delta\tau$ определить координаты точек (r_k, φ_k, z_k) траекторий капель радиуса r_{ij} и проекции их скорости $C'_{rk}, C'_{\varphi k}, C'_{zk}$. Условие осаждения капель на внутреннюю стенку циклона:

$$r_k > R_0.$$

Если условие выполняется, то к массовому расходу осевших капель G_0 добавляется массовый расход капель v -й фракции, прошедшей через подобласть S_{ij} :

$$G_0 = G_0 + g'_{ij,v}.$$

Если условие не выполняется для всех точек траектории (при $-Z_c^H < z_k < Z_c^E$), то капли радиуса $r_{ij,v}$ считаются прошедшими через циклон без осаждения на стенку. Они формируют массовый расход проходящих капель:

$$G_n = G_n + g'_{ij,v}.$$

Расход G_0 осевшей влаги определяет коэффициент осаждения $\eta_0 = G_0 / G$. Его следует рассматривать как верхнюю оценку максимально возможного коэффициента сепарации η циклона данных конструктивных размеров при данном режиме эксплуатации, так как при расчете η_0 не учитываются процессы вторичного капельного массообмена между пленкой жидкости на поверхности обечайки сепаратора и паровой фазой. Разность $\Delta\eta = \eta_0 - \eta$ является потенциально возможным эффектом от рациональной разработки промежуточных устройств системы влагоудаления циклона.

Важную информацию для дальнейшего анализа процесса формирования и движения осевшей влаги дает эпюра распределения по внутренней поверхности обечайки сепаратора удельного (на единицу площади поверхности) массового расхода осевших капель. Для ее построения на внутреннюю поверхность циклона наносится сетка опорных точек $L_{nm} (n \in [1; 2\pi / \Delta\varphi_L], m \in [1; (Z_c^H + Z_c^E) / \Delta z_L])$ с шагом $\Delta\varphi_L$ в окружном и Δz_L - в осевом направлении. Для каждой v -й фракции капель, прошедших через угловые точки $M_{ij}^{(1)}, \dots, M_{ij}^{(4)}$ подобласти S_{ij} , определяются точки $N_{ij}^{(1)}, \dots, N_{ij}^{(4)}$ на поверхности сепаратора – места оседания на нее капель. Удельный массовый расход осевших капель $r_{ij,v}$ приближенно оценивается зависимостью

$$q'_{ij,v} = g'_{ij,v} / R_0 (\Delta\varphi_0)_{ij,v} (\Delta z_0)_{ij,v},$$

где $\Delta\varphi_0 = (\varphi_0^{(3)} + \varphi_0^{(4)} - \varphi_0^{(1)} - \varphi_0^{(2)}) / 2$ - средняя окружная протяженность зоны осаждения капель $r_{ij,v}$; $\Delta z_0 = (z_0^{(2)} + z_0^{(3)} - z_0^{(1)} - z_0^{(4)}) / 2$ - средняя осевая протяженность зоны осаждения капель $r_{ij,v}$; $\varphi_0^{(1)}, \dots, \varphi_0^{(4)}, z_0^{(1)}, \dots, z_0^{(4)}$ - соответственно координаты φ и z точек $N_{ij}^{(1)}, \dots, N_{ij}^{(4)}$.

Суммарный удельный расход в произвольной опорной точке L_{nm} определяется суммированием расходов $q'_{ij,v}$, зоны осаждения которых заключают точку L_{nm} :

$$q'_{nm} = \sum \sum q'_{ij,v}.$$

По совокупности значений q_{nm} в дискретных точках L_{nm} эпюра распределения удельных расходов осевшей влаги строится путем нанесения ряда линий $q' = const$ на развертку внутренней поверхности обечайки циклонов.

Представленная методика расчетно-теоретического анализа движения капельной влаги в вертикальном циклоне реализована в вычислительной программе SEPARAT [14, 15]. Она написана на алгоритмическом языке Borland Pascal и ориентирована для использования на персональных компьютерах семейства IBM PS и совместимых с ними. Входящий в ее состав вычислительный компонент SIMULATION_GASODYNAMICS позволяет проводить численные расчеты по газодинамическим моделям кинематики и первичного осаждения жидкой полидисперсной капельной фазы из пространственных закрученных многофазных потоков теплоносителя в характерных элементах парового тракта энергоустановок [9, 14]. Второй входящий в ее состав вычислительный компонент SIMULATION_MULTIPHASE_FLOWS позволяет проводить численные расчеты сепарации капельно-пленочной влаги в характерных элементах парового тракта энергоустановок [15].

В результате выполнения программы определяются следующие данные:

- коэффициент осаждения влаги η на внутреннюю стенку сепаратора;
- дисперсный состав прошедшей через сепаратор влаги, характеризующийся гистограммой распределения ее массового расхода по размерам капель;
- эпюра распределения по внутренней поверхности обечайки сепаратора удельного массового расхода осевших капель.

Программа позволяет выполнить исследования влияния на указанные выходные данные следующих исходных параметров:

- газодинамических параметров потока влажного пара в выходном сечении подводящего патрубка;
- основных геометрических размеров, характеризующих конструкцию сепаратора и подводящего патрубка;
- конфигурации подводящей трассы (количества и расположения поворотов в трубопроводе).

Представление о функциональных возможностях методики и программы Separat дают результаты расчета вертикального сепаратора геотермального пара, имеющего следующие размеры: $R_n = 0,075$ м; $Z_n = 0,15$ м; $R_0 = 0,15$ м; $Z_c^e = 1,15$ м; $Z_c^h = 0,5$ м; $\alpha = \beta = 0$. Режимные параметры работы сепаратора: давление пара 0,8 МПа; массовый расход $G = 0,6$ кг/с; степень влажности 0,8.

Расчетный коэффициент осаждения составляет $\eta = 0,993$ при отношении скоростей $u/w_0 = 16$. Капли размером $r_k > 2,53$ мкм оседали на внутреннюю поверхность сепаратора. Гистограмма распределения массы прошедшей влаги по размерам капель представлена на рис. 4. Видно, что вид закона распределения капель в выходном патрубке циклона существенно отличается от закона распределения капель в подводящем патрубке: он становится более равномерным.

На рис. 5 представлена часть эпюры распределения удельного массового расхода осевшей влаги по поверхности циклона. Наблюдается явно выраженная зона преимущественного осаждения капель в интервале $0 < \varphi < 70 \dots 75^\circ$ и протяженностью по высоте, соответ-

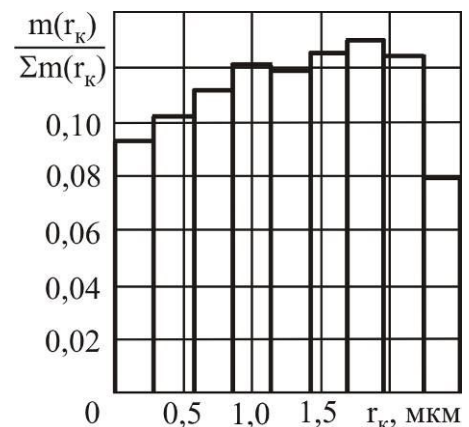


Рис. 4. Гистограмма распределения массы прошедшей влаги по размерам капель

ствующей высоте сечения подводящего патрубка. Минимальные капли радиуса 2,53...4,0 мкм успевают до осаждения на стенку циклона совершить поворот на угол более 360° . Этим объясняется наличие характерного выступа на линии равного удельного расхода $q' = 0,1$ кг/(м²·с).

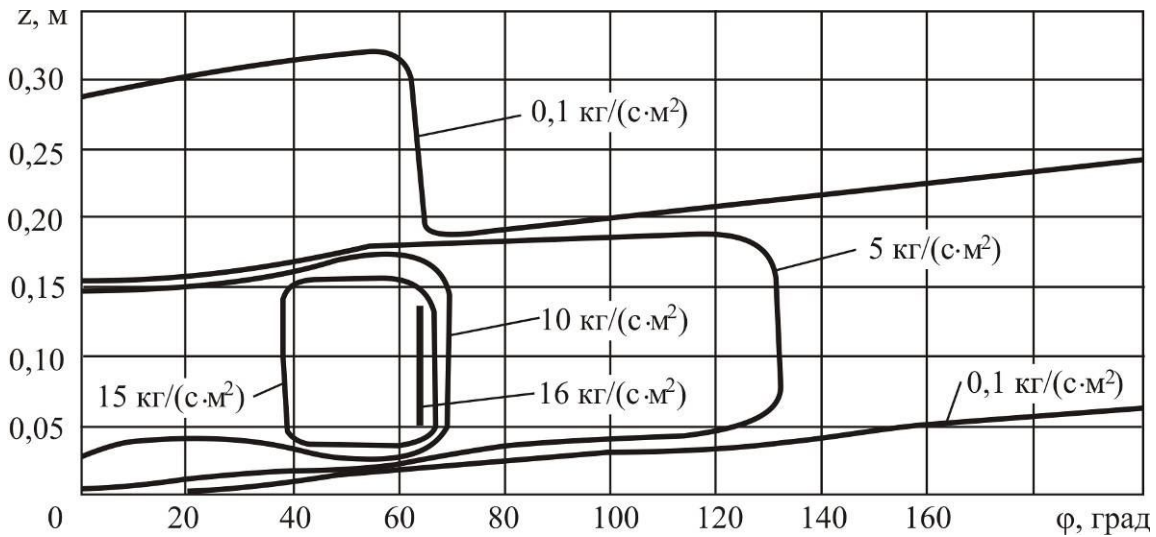


Рис. 5. Эпюра распределения массового расхода осевшей влаги по поверхности циклона

На рис. 5 представлена часть эпюры распределения удельного массового расхода осевшей влаги по поверхности циклона. Наблюдается явно выраженная зона преимущественного осаждения капель в интервале $0 < \varphi < 70 \dots 75^{\circ}$ и протяженностью по высоте, соответствующей высоте сечения подводящего патрубка. Минимальные капли радиуса $2,53 \dots 4,0$ мкм успевают до осаждения на стенку циклона совершить поворот на угол более 360° . Этим объясняется наличие характерного выступа на линии равного удельного расхода $q' = 0,1$ кг/(с·м²).

На рис. 6 приведены графики изменения параметров жидкой пленки (без учета вторичного массообмена) вдоль окружной координаты φ в сечении $z = 0,1$ м от нижнего края подводящего патрубка. Анализ эпюры $q'(\varphi, z)$ позволяет выявить места целесообразного расположения влагоотводящих щелей, а также их размеры и оценить их производительность. В частности, влагоотводящую щель длиной $0,14$ м ($z = 0,03 \dots 0,17$ м) целесообразно выполнить в сечении $\varphi = 75^{\circ}$. Желательны также дополнительные щели в сечениях $\varphi < 75^{\circ}$. Например, на рис. 6 приведен график расхода жидкой пленки $G'_{пл}$ (штриховая линия), построенный из учета выполнения двух дополнительных щелей в сечениях $\varphi = 32^{\circ}$ и $\varphi = 56^{\circ}$. В идеальном случае данная система из трех щелей дает возможность удалить из циклона до 60 % всей осевшей влаги. Это позволит резко снизить интенсивность процессов вторичного массообмена между пленкой и газовой фазой и, таким образом, повысить коэффициент сепарации циклона в сторону максимально возможного значения – коэффициента осаждения $\eta = 0,993$ [16].

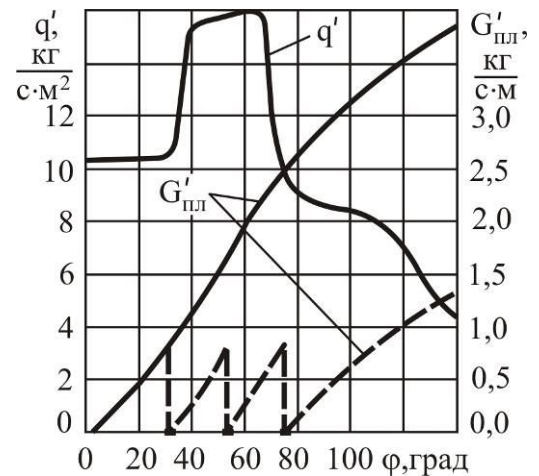


Рис. 6. Изменение параметров пленки влаги в окружном направлении (сечение $z = 0,1$ м от нижнего края подводящего патрубка)

Список литературы.

1. Агеев, А.Г. Сепарационные устройства АЭС / А.Г. Агеев, В.Б. Карасев, И.Т. Северов, В.Ф. Титов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 169 с.
2. Бузников, Е.Ф. Циклонные сепараторы в паровых котлах / Е.Ф. Бузников. – М.: Энергия, 1969. – 248 с.

3. Маргулова, Т.Х. Водные режимы тепловых и атомных электростанций / Т.Х. Маргулова, О.И. Мартынова. – М.: Высшая школа, 1987. – 319 с.
4. Стырикович, М.А. Парогенераторы электростанций / М.А. Стырикович, К.Я. Катковская, Е.П. Серов. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 384 с.
5. Филиппов, Г.А. Сепарация влаги в турбинах АЭС / Г.А. Филиппов, О.А. Поваров. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.
6. Филиппов, Г.А. Исследование и расчеты турбин влажного пара / Г.А. Филиппов, О.А. Поваров, В.В. Пряхин. – М.: Энергия, 1973. – 231 с.
7. Лагерев, А.В. Математическое моделирование массопереноса и удаления капельно-плёночной влаги в инерционно-гравитационных сепараторах влажного пара / А.В. Лагерев // Инженерно-физический журнал. - 2000. - Т. 73. - №3. - С.1-9.
8. Лагерев, А.В. Эрозия паровых турбин: вероятностный подход: в 3 т. / А.В. Лагерев. – М.: Машиностроение-1, 2006.
9. Лагерев, А.В. Моделирование процессов массопереноса влаги в вертикальных сепараторах с тангенциальным входом для АЭС / А.В. Лагерев, Э.А. Лагерева // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1997. - №3. - С.68-72.
10. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: ГИТТЛ, 1957. – 784 с.
11. Гостев, Д.Г. Гидродинамика двухфазного потока в ресиверах влажнопаровых турбин / Д.Г. Гостев, А.Н. Хрунич // Теплоэнергетика. – 1991. - № 8. – С. 60-65.
12. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
13. Кириллов, И.И. Основы теории влажнопаровых турбин / И.И. Кириллов, Р.М. Яблоник. – М.: Машиностроение, 1968. – 264 с.
14. Лагерев, А.В. Математическое моделирование кинематики и осаждения влаги из пространственных многофазных потоков в элементах паровых энергоустановок / А.В. Лагерев, Э.А. Лагерева // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008. - № 1. - С. 67-75.
15. Лагерев, А.В. Математическое моделирование кинематики и сепарации плёночной влаги в элементах парового тракта энергоустановок / А.В. Лагерев, Э.А. Лагерева // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2008. - № 3. - С. 67-75.
16. Лагерев, А.В. Оптимизация влагоудаления в вертикальных сепараторах с тангенциальным входом для АЭС / А.В. Лагерев, Э.А. Лагерева // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1997. - № 6. - С. 30-34.

Сведения об авторе

Лагерева Эльвира Александровна - кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отдела ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», elvira-l.alex@yandex.ru.

SIMULATION OF KINEMATICS AND THE SEPARATION OF POLYDISPERSE DRIP FLOW IN THE VERTICAL CYCLONES HAVING A SIDE INLET WET STEAM OR AIR

Lagereva E.A.

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University

The presented method of calculation of the separation of polydisperse condensed moisture from a flow of wet steam or air in a vertical cyclone with tangential inlet side of the flow of the working fluid, and histograms of the size distribution is not deposited drops and diagrams of the distribution on the inner wall surface of the cyclone mass flow of the precipitated liquid. It includes gas-dynamic model of the motion of the gas and liquid phases of the working fluid inside the cyclone and the approach implements the idea of spatial and fractional discretization of the separation process. On the basis of calculations of the kinematics of condensed moisture specific cyclones have shown the feasibility of improving the accepted system of dehumidification that is associated with the implementation of intermediate wicking devices, their rational placement on the surface of the shell and setting the optimum constructive sizes.

Key words: cyclone, modeling, gas dynamics model, kinematics, separation, the condensed moisture, intermediate moisture-wicking device.

DOI: 10.22281/2413-9920-2016-02-04-99-109

References

1. Ageev A.G., Karasev V.B., Severov I.T., Titov V.F. *Separatsionnye ustroystva AES* [The separation devices of the NPP]. Moscow, Energoizdat, 1982. 169 p.
2. Buznikov E.F. *Tsiklonnye separatory v parovykh kotlakh* [Separators in steam boilers]. Moscow, Energiya, 1969. 248 p.
3. Margulova T.Kh., Martynova O.I. *Vodnye rezhimy teplovykh i atomnykh elektrostantsiy* [Water regimes of thermal and nuclear power plants]. Moscow, Vysshaya shkola, 1987. 319 p.
4. Styrikovich M.A., Katkovskaya K.Ya., Serov E.P. *Parogeneratory elektrostantsiy* [The steam generators of power plants]. Moscow-Leningrad, Energiya, 1966. 384 p.
5. Filippov G.A., Povarov O.A. *Separatsiya vlagi v turbinakh AES* [Separation of moisture in turbines of the NPP]. Moscow, Energiya, 1979. 320 p.
6. Filippov G.A., Povarov O.A., Pryakhin V.V. *Issledovaniya i raschyety turbin vlazhnogo para* [Research and calculations wet steam turbines]. Moscow, Energiya, 1973. 231 p.
7. Lagerev A.V. Mathematical modeling of mass transfer and removal of droplet-film moisture in inertia-gravity separators of moist vapor. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal*, 2000, Vol. 73, No. 3, pp. 501.
8. Lagerev A.V. *Eroziya parovykh turbin: veroyatnostnyy podkhod* [Erosion of steam turbines: a probabilistic approach]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2006.
9. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Analysis of mass transfer at the vertical separators with tangential entrance for NPPs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 1997, No. 3, pp. 68-72.
10. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Moscow, GITTL, 1957. 784 p.
11. Gostev D.G., Khrunich A.N. Hydrodynamics of two-phase flow in receivers wet steam turbines. *Teploenergetika*, 1991, No. 8, pp. 60-65.
12. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical handbook for scientist and engineers. Definitions, theorems and formulas for reference and review.* McGraw-Hill Company, 1968.
13. Kirillov I.I., Yablonik R.M. *Osnovy teorii vlazhnoparovykh turbin* [Fundamentals of the theory of wet steam turbines]. Moscow. Mashinostroenie. 1968. 264 p.
14. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Mathematic simulation of drops kinematics and sedimentation from 3-dimensional multiphase flows in steam turbine elements. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, No. 1, pp. 67-75.
15. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Mathematic simulation of liquid film kinematics and separation in steam turbine elements. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, No. 3, pp. 67-75.

16. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Optimization of steam-water separation at the vertical separators with tangential entrance for NPPs. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 1997, No. 6, pp. 30-34.

Author' information

Elvira A. Lagereva - Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Vice Head of Bureau at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, *elvira-l.alex@yandex.ru*.

Дата публикации
(Date of publication):
25.12.2016