

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МАСС В ОБОРОТНЫХ СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ С ВЫПАРНЫМИ ОХЛАДИТЕЛЯМИ

Гуляенко А.Б., к.х.н., доцент,
Македон В.В., магистр,
Шульга А.В., магистр,
Одесский национальный политехнический университет
gouliaenko@gmail.com

Аннотация. Разработана методика оценки дифференциального распределения дисперсных масс в оборотных системах охлаждения с выпарными охладителями. Знание масс дисперсной фазы, которая образуется при пересыщении циркуляционной воды по солям малорастворимых соединений и формирует шламы и поверхностные отложения, позволяет прогнозировать водно-химические режимы эксплуатации оборудования, периодичность его химической очистки, а также соответствие качества продувок экологическим нормам.

При ряде допущений проведена оценка распределения дисперсной фазы между отложениями на поверхностях теплообмена конденсаторов и орошения градирен и шламом в контурах двухступенчатой охладительной системы Ровненской АЭС.

Ключевые слова: оборотная система охлаждения, поверхностные отложения, дисперсная масса, адгезия.

ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ РОЗПОДІЛ ДИСПЕРСНИХ МАС В ОБОРОТНИХ СИСТЕМАХ ОХОЛОДЖЕННЯ З ВИПАРНИМИ ОХОЛОДЖУВАЧАМИ

Гуляєнко О.Б., к.х.н., доцент,
Македон В.В., магістр,
Шульга О.В., магістр,
Одеський національний політехнічний університет
gouliaenko@gmail.com

Анотація. Розроблено методику оцінки диференціального розподілу дисперсних мас в оборотних системах охолодження з випарними охолоджувачами. Знання мас дисперсної фази, яка утворюється при пересиченні циркуляційної води по солям малорозчинних з'єднань і формує шлами і поверхневі відкладення, дозволяє прогнозувати водно-хімічні режими експлуатації обладнання, періодичність його хімічної очистки, а також відповідність якості продувок екологічним нормам.

При ряді припущень проведена оцінка розподілу дисперсної фази між відкладеннями на поверхнях теплообміну конденсаторів і зрошення градирень і шламом в контурах двоступеневої охолоджувальної системи Рівненської АЕС.

Ключові слова: оборотна система охолодження, поверхневі відкладення, дисперсна маса, адгезія.

DIFFERENTIAL DISTRIBUTION OF DISPERSE MASSES IN TURNOVER COOLING SYSTEMS WITH VAPOR COOLERS

Gulyaenko A.B, Ph.D., Associate Professor,
Makedon V.V, Master,
Shulga A.V, Master,
Odessa National Polytechnic University
gouliaenko@gmail.com

Abstract. A technique for estimating the differential distribution of dispersed masses in circulating cooling systems with evaporative coolers is developed. The mass of the dispersed phase is formed when the circulating water is supersaturated with poorly soluble compounds and forms sludges and surface sediments.

Dispersed masses are formed in condensers and cooling towers due to the shift of the carbon dioxide equilibrium and super saturation of the circulating water during its evaporation. The specific dispersed mass is determined from the difference between the experimental and calculated values of the carbonate and bicarbonate alkalinity of the circulation water and the similar pH difference. The ratio of the adhesive precipitated dispersed mass on the surfaces of suspended particles and structural elements is proportional to the ratio of their areas. The ratio of the accumulated dispersed mass in the sediments of the condenser and the cooling tower is proportional to the ratio of the products of the apparatus structural areas and the time of contact with them of a single volume of water.

The distribution of the dispersed mass between the sediments on the surfaces of the heat exchange of the condensers, the cooling of the cooling towers and the sludge in the circuits of the two-stage cooling system of Rivne NPP is estimated. It is shown that in the surface sediments up to 2 ... 3% of the dispersed mass precipitated is concentrated, and the sediment rate in the condenser is 3 ... 7 times higher than in the cooling tower.

Keywords: circulating cooling system, sediment surfaces, dispersed mass, adhesion.

Введение. Оборотные системы охлаждения (ОСО) – сложные гидротехнические инженерные объекты, назначение которых надёжный теплоотвод от объекта охлаждения. ОСО есть замкнутая последовательность объекта охлаждения, водоводов, охладителя. В ОСО мощных предприятий (электростанции, химкомбинаты, металлургические заводы), которые в Украине потребляют до 50 % всей технической воды, в качестве охладителя используют выпарные градирни или пруды-охладители. Подпитка ОСО осуществляется из природных поверхностных водоёмов.

При выпаривании циркуляционной воды происходит концентрирование растворённых солей вплоть до потери устойчивости, когда из пересыщенного раствора выпадает осадок. Дисперсный осадок способен к взаимодействию в объёме воды (образуются частицы шлама) и к адгезии на конструктивных поверхностях (образуются поверхностные отложения). Отложения увеличивают тепловые и гидравлические сопротивления в ОСО, их массовые накопления ведут к механическому разрушению элементов ОСО. Накопление шлама создаёт экологическую проблему, из-за его выброса в окружающую среду с продувочной водой.

Следовательно, дифференциальная оценка дисперсных масс способных к накоплению на поверхностях теплообмена конденсаторов и орошения градирен, а также массы шлама в контуре ОСО необходимы для надёжного прогнозирования работы ОСО [1].

Анализ последних публикаций. Образование дисперсной массы из растворов, пересыщенных по солям накипеобразователям, изучалось Кишневским В.А., Чичениным В.В., Боднарем Ю.Ф., Неведровым А.В., Liu W., Andritsos N., Bansal B., Millero F.J., Kostoglou M., Karabelas A.J. и другими исследователями. При всех различиях в их подходах к проблеме, общим являются утверждения того, что смещение углекислотного равновесия и пересыщение исходного раствора относительно предела растворимости – причина появления дисперсных зародышей.

В работах Терентьева В.И., Балабан-Ирменина Ю.В., Панченко В.В., Wei L., Budair M.O., Roques H., Keysar S., Somerscales E.F.C., Dunqi X., Morse R.W., Watkinson A.P. и многих других авторов, рассмотрено формирование отложений на теплообменных поверхностях. Исследования часто проводились в идеальных условиях: пересыщенный раствор постоянного качества одноразово обтекал (при произвольных гидродинамических условиях) поверхность, где образовывались отложения. В полученных феноменологических зависимостях отразилось влияние гидродинамических (скорость водяного потока, шероховатость поверхности обтекания) и термических (температура, вектор теплового потока) факторов на интенсивность поверхностных отложений.

Работы Кикоша О.В., Арефьева Ю.И., Давлетшина Ф.М., Glade H.J., Ulrich Ponce-Ortega J.M., Nebot E., Li W., освещающие результаты комплексных исследований выпарных градирен, практически не затрагивают тему отложений. В тоже время из информационных сообщений следует, что отложения на поверхностях орошения, особенно в зимний период, могут привести к серьёзным разрушениям.

Кишневский В.А., Чиченин В.В., Ковальчук В.И., Наумов А.В., Архипенко А.В., Малахов И.А., Смирнов А.Ю., Taborek J., Krause S., Chamra L.M., Al-Rawajfeh A.E. и другие, исследуя водно-химических режимов реальных объектов установили, что интенсивности отложений в различных элементах замкнутых контурах взаимосвязаны. Однако, указанная взаимосвязь формирования отложений в отдельных элементах ОСО практически не изучена.

Цели и задачи. Цель работы – разработка методики оценки дифференциального распределения дисперсной массы, выделяемой в контуре ОСО.

Задача работы – изучить дифференциальное распределение дисперсной массы между отложениями на поверхностях теплообмена конденсаторов и орошения градирен и шламом в охлаждающей воде двухступенчатой ОСО.

Объекты и методы исследования. Объектом исследования является процесс распределения дисперсной массы, выделенной из перенасыщенной по ионам HCO_3^- и CO_3^{2-} циркуляционной воды ОСО, между отложениями на конструктивных поверхностях конденсаторов и градирен и поверхностями взвешенных в воде шламовых частиц.

Результаты исследования. В конденсаторе охлаждающая вода нагревается, смещая углекислотное равновесие вдоль цепочки $\text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 \uparrow$ и повышая рН. В пограничном слое водного потока, где прогрев и значение рН максимальны, образуются карбонатные микрокристаллы, которые сорбируются на поверхности теплообменных трубок (образуя поверхностные отложения) или взаимодействуют с поверхностью других дисперсных зародышей или микрокристаллов (образуя частицы шлама). Поскольку контакт с атмосферой в конденсаторе отсутствует, абсорбированные газы находятся в гидратированной форме, а CO_2 десорбируется из нагретой воды, пересыщенной по гидратированным газам, в водоводах конденсатор – градирня.

Вода в градирне, охлаждаемая атмосферным воздухом до температуры мокрого термометра за счёт выпаривания и конвекции, хемосорбирует из охлаждающего воздуха углекислый газ и последовательно переводит растворённый CO_2 в H_2CO_3 , HCO_3^- и CO_3^{2-} . рН циркуляционной воды уменьшается вследствие диссоциации H_2CO_3 и HCO_3^- . Однако, в щелочной воде ионы H^+ нейтрализуются. Поскольку константы диссоциации H_2CO_3 и HCO_3^- малы, значение рН охлаждающей воды в циркуляционном контуре определяется добавочной водой, которая компенсирует технологические потери ОСО.

Вследствие выпаривания охлаждающей воды, концентрации растворённых веществ растут вплоть до порога нестабильности, за которым образуются слабо растворимые зародыши карбонатов щёлочноземельных и переходных металлов. Рост концентраций ограничен ионами Cl^- и SO_4^{2-} (деполяризаторы коррозии), отношение концентраций которых в циркуляционной и добавочной воде равно коэффициенту упаривания K_y . Требуемый уровень K_y обеспечивается продувкой контура ОСО, которая с капельным уносом распыленной в градирне охлаждаемой воды встречным потоком охлаждающего воздуха и выпаром циркуляционной воды составляет технологические потери.

Рассмотрено дифференциальное распределение дисперсных масс в двухступенчатой ОСО Ровенской АЭС, схема которой представлена на рис. 1. 1-я ступень – охлаждение конденсаторов 4-го блока, 2-я ступень – охлаждение конденсаторов 1-го, 2-го и 3-го блоков. Продувка 1-ой ступени служит добавочной водой для 2-ой ступени. Часть продувки 2-й ступени рециркулирует на предвключённый осветлитель, где в смеси с исходной водой подвергается известкованию и в качестве добавочной возвращается в циркуляционный контур 1-й ступени. Характеристики охладительных ступеней приведены в табл. 1.

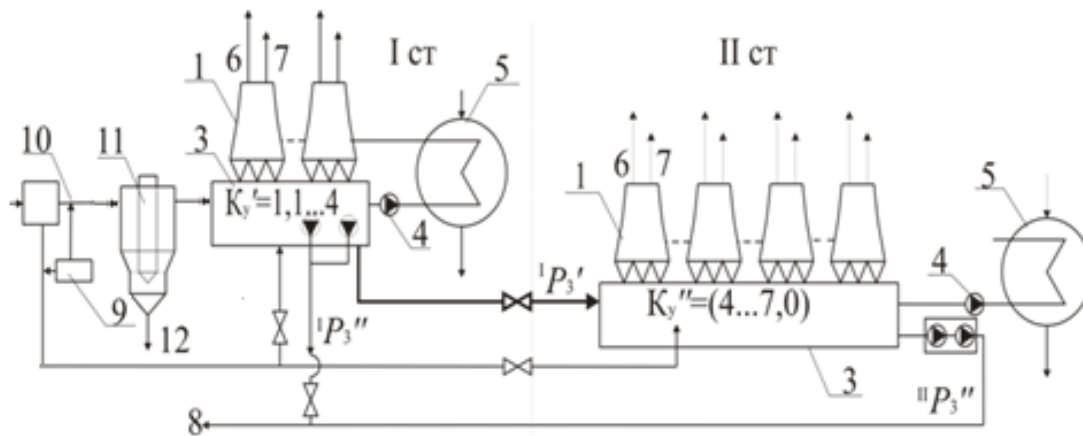


Рис 1. Схема двухступенчатой системы охлаждения РАЭС:

1 – градирня; 2 – добавочная вода; 3 – ковш градирни; 4 – насос; 5 – конденсатор; 6 – удельные потери воды на испарение P1; 7 – удельные потери воды с капельным уносом P2; 8 – удельные потери воды на продувку P3; 9 – ввод реагентов; 10 – вода кондиционированная; 11 – осветлитель; 12 – сброс продувки осветлителя; K_y^I, K_y^{II} – коэффициенты упаривания 1 и 2 ступеней; $^I P_3$ – частичная продувка 1 ступени (сбрасывается во 2 ступень); $^I P_3''$ – продувка 1 ступени; $^{II} P_3$ – продувка 2 ступени

Таблица 1 – Характеристики охладительных ступеней

Параметры охладительных ступеней	Ступени	
	1	2
Охлаждаемые блоки, № п/п	4	1, 2, 3
Мощность блоков, N, ГВт	1	1,88
Число градирен, n_r	2	4
Суммарная площадь орошения, $S_r, м^2$	20000	40000
Число конденсаторов, n_k	2	4
Суммарная площадь нагрева, $S_k, м^2$	99480	139960
Объём воды в резервуарах, $V^j, j - I, II, м^3$	$7 \cdot 10^4$	$25 \cdot 10^4$
Расход охлаждающей воды, $G^j, j - I, II, м^3/час$	$16 \cdot 10^4$	$30 \cdot 10^4$
Коэффициент упаривания, $K_y^j, j - I, II$	1...4	4...6

Зародыши дисперсной массы образуются в теплообменных аппаратах ОСО (конденсаторы, градирни), вследствие смещения углекислотного равновесия и роста пересыщения циркуляционной воды. Удельную массу дисперсной фазы $m_{(CaCO_3)}$, ($г/м^3$), потенциально способную к выпадению в осадок при выпаривании циркуляционной воды и эквивалентном росте пересыщения, можно определить в соответствии с методикой [2], по разнице экспериментально определенных и расчётных значений щёлочности (карбонатной и бикарбонатной), а также аналогичной разности рН циркуляционной воды. Химический состав и расчётные показатели охлаждающей воды представлены в табл. 2.

В известкованной воде отношение вероятности адгезии новообразованных зародышей на дисперсных частицах и на поверхности теплообмена $\alpha = 50...60$ [3], т.е. скорости осаждения (накопления) дисперсной массы соответственно равны $w_{\text{шл}}$ (г/час), $w_{\text{отл}}^k$ (г/час):

$$w_{\text{отл}}^k = G^j \cdot \frac{m_{(CaCO_3)}}{\alpha}, \text{ (г/час)}, \quad (1)$$

$$w_{\text{шл}} = G^j \cdot m_{(CaCO_3)} - w_{\text{отл}}^{\Sigma} \text{ (г/час)}. \quad (2)$$

Таблица 2 – Химический состав и расчетные показатели охлаждающей воды

Химический состав циркуляционной воды КОСО РАЭС							Расчетные показатели			ΔрН	K _y	m _(CaCO₃) МГ/ДМ ³ (Г/М ³)
№ ступени	СО ₂	Ж ₀	СГ	SO ₄ ²⁻	Щ ₀	рН	Щ ₀		рН			
	МГ/ДМ ³	МГ-ЭКВ/ДМ ³					HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻				
							МГ-ЭКВ/ДМ ³					
1	0,013	6,9	1,13	2,08	3,2	8,5	3,1	0,058	8,69	0,19	3,6	306,8
2	0,018	4,8	1,9	3,5	3,0	8,53	2,94	0,040	8,55	0,02	6	350,3

Вероятность осаждения частиц пропорциональна произведению площади поверхности S (м²) и времени контакта τ (с) выделенного объема воды с поверхностью. Отношение вероятности осаждения в конденсаторе и градирне $\xi = (S_k \cdot \tau_k) \cdot (S_r \cdot \tau_r)^{-1} = 15...20$, где $\tau_k = 10...14$ с, $\tau_r = 30...40$ с, при соизмеримой вероятности адгезии дисперсных частиц на материалах элементов ОСО. Если $w_{отл}^r = w_{отл}^k \cdot \xi^{-1}$ – скорость накопления отложений в градирне, то суммарная скорость накопления поверхностных отложений $w_{отл}^\Sigma = w_{отл}^r + w_{отл}^k = w_{отл}^r \cdot (1 + \xi)$, а интенсивности отложений:

$$J_{отл}^r = \frac{w_{отл}^\Sigma}{S_r \cdot (1 + \xi)}, \quad (\text{Г/М}^2 \cdot \text{час}), \quad (3)$$

$$J_{отл}^k = \frac{\xi \cdot J_{отл}^r}{S_k}, \quad (\text{Г/час}). \quad (4)$$

В табл. 3 представлены интенсивности отложений и дисперсные массы, осажденные (конденсатор, градирня) на поверхностях элементов ОСО и дисперсных частиц.

Таблица 3 – Суммарное накопление дисперсных масс (кг/час) и интенсивности (г/м²·час) поверхностных отложений в элементах ОСО

Сорбция частиц дисперсной фазы на поверхности	Ступени охлаждения ОСО			
	1-ая, $\xi = 12$		2-ая, $\xi = 20$	
	$(w_{отл}^i)^I$	$(J_{отл}^i)^I$	$(w_{отл}^i)^II$	$(J_{отл}^i)^II$
нагрева конденсаторов	0,982	0,0099	2,11	0,015
орошения градирен	0,082	0,0041	0,105	0,0026
дисперсных частиц	48,024	-	102,87	-

Полученные числовые значения удовлетворительно коррелируют с экспериментальными значениями отложений в конденсаторах и градирнях Ровненской АЭС [4, 5]. Следует, однако, отметить, что полученные числовые значения несколько завышены, поскольку коэффициенты α и ξ определены из предпосылки о независимости адгезионных явлений от материала поверхности отложений. Из известных нам источников следует, что адгезия на поверхности изоморфных дисперсных частиц более вероятна, чем на поверхности металла и, тем более, пластмассы [6]. Кроме того, не приняты во внимание возможность использования шариковой очистки в трубах конденсатора и специфика формирования отложений на наклонных и вертикальных поверхностях орошения в градирне. Учет этих особенностей увеличивает долю осажденных дисперсных зародышей на поверхности других дисперсных частиц.

Знание распределения дисперсной массы между возможными поверхностями осаждения позволяет прогнозировать водно-химические режимы, периодичность химической очистки и соответствие качества продувок экологическим нормам. Так

представленная выше оценка дифференциального распределения дисперсной массы между частицами шлама и отложениями в конденсаторе и градирне ОСО показывает, что второй контур работает в более напряжённых условиях и требует более интенсивной продувки для удаления избыточного шлама. Но выброс в окружающую среду сильно диспергированных и минерализованных продувок ведёт к серьёзным экологическим последствиям, что требует внедрения технологий обработки продувочной воды [7].

Выводы и перспективы дальнейших исследований.

1. Разработана методика оценки соотношения дисперсных масс микрокристаллов выпадающих в осадок и отложения на поверхностях нагрева конденсаторов, поверхностях орошения градирен и поверхностях других частиц дисперсной фазы, что позволяет рассмотреть баланс дисперсной фазы в ОСО.

2. В циркуляционной системе ОСО на поверхностях теплообмена конденсаторов и поверхностях орошения градирен осаждается не более 2...3 % массы частиц дисперсной фазы. Остальная масса частиц агрегируется и формирует шлам.

3. Интенсивности выпадения отложений в градирнях в 3...7 раза меньше, чем интенсивности выпадения отложений в конденсаторе.

4. Для дальнейших исследований и уточнения разработанной методики необходимо провести экспериментальные исследования осаждение дисперсной массы на поверхностях теплообмена конденсатора и орошение градирни при масштабном соответствии тепловых и гидравлических параметров оборотной системы охлаждения реальным объектам.

Литература

1. Кишневський В.П. Методи та засоби удосконалення структур зворотних систем охолодження атомних електростанцій та їх водно-хімічних режимів : автореф. дис. ... док. техн. наук : 05.14.14 / В.П. Кишневський. – Одеса, 2013. – 38 с.

2. Кишневский В.А. Расчёт углекислотного равновесия в системах охлаждения крупных электростанций / В.А. Кишневский, В.В. Чиченин, В.Г. Ахрамеев // Труды Одесск. политехн. ун-та. – 2014. – 2 (44). – С. 92-94.

3. Гуляенко О.Б. Вплив підкислення циркуляційної води на диференційний розподіл дисперсної фази / О.Б. Гуляенко, В.В. Чиченін, В.Г. Ахрамеев // Праці Одеськ. політехн. ун-ту. – 2015. – 2 (46). – С. 75-78.

4. Акты осмотра башенных градирен № 1, 2, 3, 4 системы циркуляционного водоснабжения // Кузнецовск: РАЭС, 2000. – 34 с.

5. Акты осмотра конденсаторов блоков № 1, 2, 3, 4 системы циркуляционного водоснабжения // Кузнецовск: РАЭС, 2009. – 38 с.

6. Бушуев Е.Н. Исследование и математическое моделирование химико-технологических процессов водообработки на ТЭС : автореф. дис. ... док. техн. наук : 05.14.14 / Е.Н. Бушуев. – Иваново, 2010. – 40 с.

7. Шуляк І.Д., Удосконалення оборотних систем охолодження з рециркуляцією продувки і вбудованими водопідготовчими установками на АЕС : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / І.Д. Шуляк. – Одеса, 2014. – 21 с.

Стаття надійшла 18.10.2017