

М.Е. Баранова, А.С. Гаврилов, К.Б. Чихачев

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ БАШЕННЫХ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ГРАДИРЕН НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

М.Е. Baranova, A.S. Gavrilov, K.B. Tchikhatchev

NUMERICAL PREDICTION OF THE IMPACT OF COOLING TOWERS ON THE ENVIRONMENT

Предлагается комбинированная гидротермодинамическая численная модель для расчета негативного воздействия градирен на морской воде на окружающую среду применительно к проектируемым объектам ядерной энергетики. Первоначально по данным стандартной гидрометеорологической информации с использованием модели атмосферного пограничного слоя на территории в радиусе 30 км до высоты 2 км рассчитываются поля скорости ветра, температуры и влажности. Результаты этих расчетов используются далее в качестве исходных для гидротермодинамической 3D модели с воспроизведением особенностей обтекания каждой градирни и формируемого ими пароконденсатного факела. На третьем этапе с использованием метода Монте-Карло рассчитываются траектории движения капель соленой воды с учетом всех значимых эффектов их взаимодействия с окружающим пространством.

Ключевые слова: ядерная энергетика, численное моделирование атмосферы, башенные испарительные градирни.

We consider the combined hydrothermodynamic numerical model to calculate a negative influence of cooling towers on seawater on the environment with reference to projectible objects of nuclear power. Pristinely according to the standard hydrometeorological information with use of model of an atmospheric boundary layer of the area in radius of 30 km up to height of 2 km the fields of wind speed, temperature and humidity are calculated. Then results of these calculations are used as initial values for hydrothermodynamic 3D model with reproduction of features of a flow of each cooling tower and formed by them a steam-condensate plume. At the third stage with use of Monte-Carlo method taking into account all significant effects of their interaction with surrounding space trajectories of motion of the drops of salty water are calculated.

Key words: nuclear power energetics, numerical simulations of the atmosphere, evaporative cooling tower.

Наличие систем охлаждения – неизменный атрибут энергетических объектов. Как известно, такого рода системы могут быть прямоточными или оборотными. Использование для этих целей обширных источников воды диктует необходимость их расположения в прибрежных зонах морей или крупных водоемов. В связи с существующими во многих странах запретами на использование для этих целей пресноводных водоемов, строительство наиболее мощных объектов энергетики, прежде всего атомных электростанций, очень часто осуществляется на морских побережьях с привлечением таких эффективных систем охлаждения, как башенные испарительные градирни.

Между тем, единственным источником технической воды для градирен в этом случае является морская. Частичный унос водяных капель через верхний срез башен градирен приводит здесь к возникновению антропогенных источников нового типа, способствующих солевому загрязнению прибрежной зоны и которые в современной природоохранной практике оказываются слабо исследованными. Проблема состоит в том, что градирни – это крупные сооружения высотой до 150–170 м и диаметром 50–70 м, которые в значительной степени искажают обтекающий их поток воздуха с образованием выраженных циркуляционных зон. При этом в атмосфере формируются так называемые «пароконденсатные» факела, состоящие как из капель соленой воды, так и из конденсирующихся на естественном атмосферном аэрозоле капель пресной воды из выбрасываемого градирней водяного пара. Все эти процессы формируют уникальные термодинамические поля вокруг градирен, требующие для своего физико-математического описания совершенных математических моделей с корректным воспроизведением микрофизических эффектов взаимодействия капель воды с окружающей средой.

Подробный анализ технических особенностей функционирования градирен на морском побережье применительно к строящейся в настоящее время Ленинградской атомной электростанции в г. Сосновый Бор под Санкт-Петербургом (так называемая ЛАЭС-2) представлен в публикациях [1, 2].

Выбор способа математического моделирования условий образования пароконденсатного факела над градирней и расчета осаждения воды и соли в окружающей 30-километровой зоне определяется, в первую очередь, необходимостью детального воспроизведения в окрестности каждой градирни трехмерных полей скорости ветра, температуры, влажности и водности с пространственной дискретностью (Δ) не более нескольких метров. Это вытекает из условия $\Delta \ll D$, где D – минимальный диаметр верхнего выходного отверстия градирни.

Необходимость столь малого пространственного разрешения входит в противоречие с требованием расчета условий водно-солевого осаждения во всей 30-километровой зоне, поскольку для такого расчета потребуются слишком значительные вычислительные ресурсы. В настоящее время достижение поставленной цели оказывается целесообразным путем комбинации трех типов моделей, ориентированных на описание процессов различного пространственно-временного масштаба (рис. 1).

Первая модель должна воспроизводить вертикальное распределение скорости ветра, температуры и влажности во всем атмосферном пограничном слое (вплоть до высоты 2 км) на основе информации стандартных метеорологических наблюдений (температура и влажность на высоте 2 м, скорость и направление ветра на высоте 10 м, заданные каждые 3 ч в так называемые «синоптические сроки»). Такого рода модель (далее АПС-модель) позволяет воспроизвести существенно сглаженную по пространству структуру метеорологических полей с характерным временным масштабом изменений 3 ч. Подобная модель активно

используется в настоящее время авторами [4, 7] в задачах охраны окружающей среды, достаточно хорошо тестирована и верифицирована.

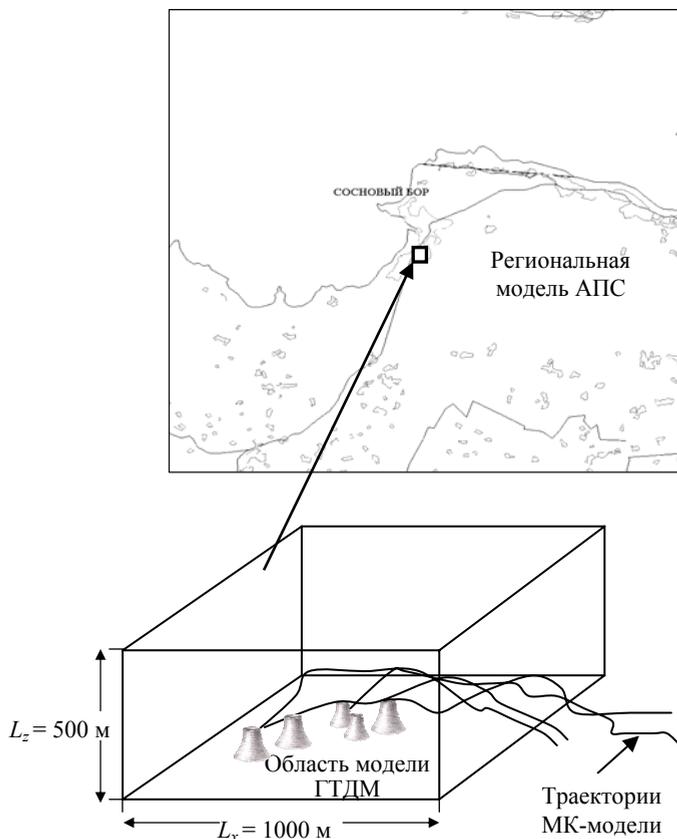


Рис. 1. Пространственные области комбинирования различных численных моделей

Вторая из этих моделей должна детально и с требуемым разрешением воспроизвести трехмерную структуру осредненных полей скорости ветра, температуры, влажности и водности в ограниченной зоне влияния градирен размером до 1000 м по горизонтали и до высоты 500 м (ожидаемая высота подъема пароконденсатного факела при условиях, близких к штиту). Такого рода модель относится к классу так называемых «гидротермодинамических 3D моделей» (далее ГТДМ-модели). Следует отметить, что характерное время установления процесса обтекания градири составляет от нескольких минут до нескольких десятков минут (в зависимости от скорости ветра), что и может быть принято за характерный временной масштаб этой модели.

Задача моделирования атмосферы на этом этапе – восстановить трехмерные поля скорости ветра, температуры, влажности и водности с учетом динамического и термического влияния собственно градирен на термодинамические

процессы в атмосфере. Для этой цели привлекается предложенная в работах [3, 7, 8] численная модель обтекания элементов застройки, протестированная и верифицированная применительно к проблеме моделирования городской атмосферы, которая дополняется уравнениями турбулентной диффузии водяного пара и водности с некоторыми традиционными приближениями (например, [6]).

Запишем систему осредненных уравнений динамики атмосферы для компонент вектора скорости (u_1, u_2, u_3) , отклонений потенциальной температуры (ϑ) и массовой доли водяного пара (q) от своих фоновых значений (θ, S) , вычисляемых с помощью описанной выше модели АПС, а также водности (δ) на вращающейся Земле в системе декартовых координат x_i , направив ось $x_1 \equiv x$ для определенности на восток, ось $x_2 \equiv y$ на север, а $x_3 \equiv z$ вертикально вверх:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_\alpha \frac{\partial u_1}{\partial x_\alpha} = -\frac{\partial \pi}{\partial x_1} + l(u_2 - V_G) + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} K \frac{\partial u_1}{\partial x_\alpha}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_\alpha \frac{\partial u_2}{\partial x_\alpha} = -\frac{\partial \pi}{\partial x_2} - l(u_1 - U_G) + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} K \frac{\partial u_2}{\partial x_\alpha}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial t} + u_\alpha \frac{\partial u_3}{\partial x_\alpha} = -\frac{\partial \pi}{\partial x_3} + \beta \vartheta + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} K \frac{\partial u_3}{\partial x_\alpha}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} + u_\alpha \frac{\partial \vartheta}{\partial x_\alpha} = \frac{L}{C_p} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} K \frac{\partial \vartheta}{\partial x_\alpha}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_\alpha \frac{\partial q}{\partial x_\alpha} = -\varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} K \frac{\partial q}{\partial x_\alpha}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + (u_\alpha - W_S \delta_{i3}) \frac{\partial \delta}{\partial x_\alpha} = \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} K \frac{\partial \delta}{\partial x_\alpha}, \quad (6) \quad \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\alpha} = 0. \quad (7)$$

Здесь $\pi = P/\rho$ – давление воздуха, нормированное на среднюю его плотность; g – ускорение свободного падения; l – параметр Кориолиса; L – удельная теплота парообразования; C_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении. По индексу α производится суммирование, а δ_{ij} – единичный тензор.

Величина W_S – скорость седиментации (осаждения водных капель), для которой принималась упрощенная формула из [6]:

$$W_S = W_\infty \left[1 - \frac{64}{(2 + 1,210^{-3} R_m)^6} \right], \quad (8)$$

где $W_\infty \approx 10$ м/с, а модальный радиус распределения капель по размерам R_m задается в микронах.

Коэффициент турбулентности K в исходных уравнениях модели отражает вклад в процессы переноса подсеточной турбулентности и рассчитывается исходя из приближенного соотношения:

$$K = \chi \Delta_L^2 \left| \frac{\partial V}{\partial L} \right|, \quad (9)$$

где $\Delta_L^2 = \frac{1}{3}(\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2)$ – средний квадрат шагов пространственной ячейки

используемой вычислительной сетки; $\left| \frac{\partial V}{\partial L} \right|$ – модуль градиента скорости в данной точке; χ – числовой коэффициент, подбираемый исходя из условия обеспечения устойчивости численной схемы ($\chi \approx 0,1$).

Величина скорости конденсации ε определяется из условия полной конденсации избытка водяного пара по отношению к насыщающим его значениям при данной температуре, так что на каждом следующем шаге по времени $n + 1$ эта величина определяется по температуре и влажности на предыдущем шаге n следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon^{n+1} &= 0 \text{ при } q^n + S \leq S_{\max}(T + \vartheta^n); \\ \varepsilon^{n+1} &= q^n + S - S_{\max}(T + \vartheta^n) \text{ при } q^n + S > S_{\max}(T + \vartheta^n). \end{aligned} \quad (10)$$

Столь упрощенный подход в описании поведения водной фазы не позволяет, однако, воспроизвести все эффекты фазовых переходов в такой сложной термодинамической системе, как пароконденсатный факел с каплями воды различной солености. По этой причине результаты расчетов по второй модели используются далее лишь для воспроизведения фоновых полей второго уровня для скорости ветра, температуры и влажности, используемых в третьей из рассматриваемых моделей. Характерные примеры такого рода расчетов полей температуры и влажности в окрестности градирен приведены на рис. 2.

Третья модель должна отслеживать эволюцию собственно капель с тем или иным заданным начальным распределением по размерам в процессе их движения в атмосфере вплоть до удаления от градирни на требуемую дальность. При этом необходимо полностью описывать микрофизику капель с учетом влияния на скорость их испарения таких факторов, как текущая соленость капли, которая меняется с изменением размеров капли, охлаждение капли в процессе испарения (нагревание в случае конденсации), а также взаимодействие капли с окружающим пространством. Характерные временные масштабы этих процессов – доли секунды, что и определяет необходимый шаг интегрирования соответствующих уравнений.

Наиболее подходящий метод описания таких процессов – это метод Монте-Карло, предполагающий построение траекторий движения некоторой ограниченной совокупности частиц, со случайно выбранными начальными условиями,

которые движутся со случайными скоростями и движение которых отслеживается до тех пор, пока эти частицы не столкнутся с поверхностью градирни, подстилающей поверхностью или не выйдут за пределы рассматриваемой области. Подобный метод (далее МК-модель) в последние годы достаточно хорошо апробирован, в том числе и при расчете трансформации нуклидов в атмосфере [9], а реализующие ее численные алгоритмы достаточно хорошо тестированы и верифицированы. Сходная задача о турбулентной диффузии капель ненулевой солености была успешно решена ранее применительно к расчету водосолевого выброса с поверхности океана [5].

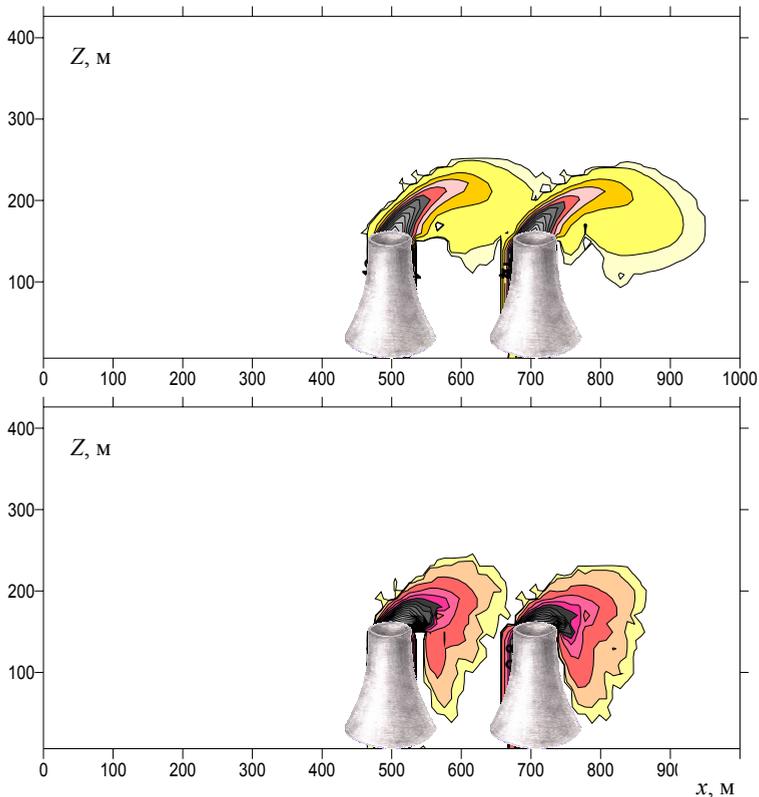


Рис. 2. Пример расчета вертикальных сечений аномалий полей температуры (наверху) и водности (внизу) при скорости ветра 3 м/с, направленного вдоль линии соединения осей градирен, и относительной влажности воздуха 80 %

Полное описание стохастической модели турбулентной диффузии частиц примеси дано в [7]. Здесь мы ограничимся лишь основными уравнениями и теми дополнительными соотношениями, которые необходимы для описания микрофизики капли.

Основное уравнение для случайных координат траекторий капли имеет следующую простую форму:

$$\frac{dX_i}{dt} = U_i^k [X_i(t)]; \quad (11)$$

$$X_i(0) \in \Omega_G,$$

где $X_i(t)$ – координаты случайной траектории ($i = 1, 2, 3$) капли, начавшей свое движение в момент времени $t = 0$ из точки, принадлежащей множеству точек внутренней полости градирни Ω_G ; $U_i^k [X_i(t)]$ – случайная скорость капли, способ задания которой и определяет, по существу, ту или иную модификацию модели стохастической диффузии.

Следуя [5, 7], запишем общие уравнения микрофизики капли для определения ее скорости U_i^k , массы M_K , температуры T_K и массовой доли водяного пара q_K на ее поверхности, а также турбулентных флуктуаций скоростей (u'_i) и температур (θ') в точке нахождения капли:

$$\frac{d}{dt} M_K U_i^k = 6\pi(1 + \frac{1}{6} \text{Re}^{2/3}) \rho \nu R_K (u_i + u'_i - U_i^k) - M_K g, \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} M_K = 2\pi S_h \rho D_w R_K^2 \frac{q - q_K}{R_K + \frac{D_w}{\alpha_w} \sqrt{\frac{2\pi}{R_w T}}}, \quad (13)$$

$$C_w M_K \frac{dT_K}{dt} = 2\pi \lambda N_U R_K (\theta + \vartheta - T_K) + L \frac{d}{dt} M_K, \quad (14)$$

$$q_K = S_{\max}(T_K) \left[1 + a_s \frac{\zeta}{1 - \zeta} \right]^{-1}, \quad (15)$$

$$M_K = \frac{4}{3} \pi R_K^3 \rho_K, \quad (16)$$

$$\frac{du'_i}{dt} = -\frac{u'_i}{\tau_L} + \beta \theta' \delta_{i3} - u'_\alpha \frac{\partial u_i}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial R_{i\alpha}}{\partial x_\alpha} + \xi_i, \quad (17)$$

$$\frac{d\theta'}{dt} = -\frac{\theta'}{\tau_L} - u'_\alpha \frac{\partial(\theta + \vartheta)}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial H_\alpha}{\partial x_\alpha} + \xi_{\theta'}. \quad (18)$$

Здесь

$$\text{Re} = \frac{2R_K}{\nu} \left[\sum_{i=1}^3 (u_i + u'_i - U_i^k)^2 \right]^{1/2},$$

$$S_h = 2(1 + b \text{Re}^{1/2} S_C^{1/3}), N_U = 2(1 + b \text{Re}^{1/2} P_r^{1/3}) -$$

числа Рейнольдса, Шервурда и Нуссельта для капли соответственно; ν – кинематическая вязкость воздуха; $S_C = 0,7$ – число Шмидта; $P_r = 0,8$ – число Пран-

дтля для воздуха; ρ_K – плотность капли; ρ – плотность воздуха; D_W – коэффициент молекулярной диффузии водяного пара; R_W – газовая постоянная для водяного пара; C_W – удельная теплоемкость капли; λ – коэффициент теплопроводности воздуха; g – ускорение свободного падения; L – удельная теплота парообразования; $\alpha_W \approx 0,036$, $b = 0,23$ – константы.

Вычисление функций $R_{ij} = \langle u'_i u'_j \rangle$ (тензор турбулентных напряжений Рейнольдса), $H_i = \langle u'_i \theta' \rangle$ (кинематический турбулентный поток тепла), τ_L (лагранжевый временной масштаб турбулентности), а также случайных возмущений ξ_i, ξ_0 в уравнениях (17) и (18) основано в данной модели на дополнительном привлечении уравнений для вторых и третьих моментов турбулентных пульсаций [7] и здесь для простоты изложения не рассматривается.

Уравнение (14) для температуры капли записано с учетом существования скачка влажности на поверхности капли, а насыщающая массовая доля водяного пара q_K рассчитывается по (15) в зависимости от текущей солёности капли ζ (следствие известного закона Рауля относительно испарения с поверхности растворов), причем для сферической капли эта величина может быть увязана с начальной солёностью капли ζ_0 и начальным радиусом капли R_{0K} следующим образом:

$$\zeta = \frac{\rho_{SW} \zeta_0 R_{0K}^3}{\rho_W (R_K^3 - R_{0K}^3) + \rho_{SW} R_{0K}^3}, \quad (19)$$

где ρ_{SW} и ρ_W – плотности используемой технической воды и чистой воды соответственно, причем первая из этих величин также может быть выражена через начальную солёность технической воды:

$$\rho_{SW} = \rho_W \left[1 + \zeta_0 \left(\frac{\mu_s}{\mu_W} - 1 \right) \right], \quad (20)$$

где μ_s, μ_W – молярные веса растворенных солей и чистой воды соответственно. Аналогичная формула используется также и для расчета величины текущей плотности капли ρ_K , но с подстановкой ζ вместо ζ_0 . Входящая в выражение (15) насыщающая массовая доля водяного пара $S_{\max}(T_K)$ рассчитывается по известной формуле Магнуса (например, [6]).

Начальные условия для всех искомым величин задаются исходя из предположения о термодинамическом равновесии во внутренней полости градирни, откуда в соответствии с условием (11) «стартуют» все капли, так что температура капли принимается здесь совпадающей с температурой воздуха внутри градирни, массовая доля водяного пара на ее поверхности принимается равной насыщающему значению при этой температуре (с учетом начальной солёности), а скорость движения капель полагается совпадающей со скоростью воздуха:

$$T_K = \Delta T + T, \quad q_K = S_{\max}(T_K) \left[1 + a_s \frac{\zeta_0}{1 - \zeta_0} \right]^{-1}, \quad U_i^K = u_i \quad (21)$$

Что касается начального значения радиуса капли R_{0K} , то оно задается исходя из принятой модели распределения капель по размерам. При этом взаимодействия капель с ограждениями градирни или подстилающей поверхностью описываются исходя из полного их поглощения в момент соприкосновения с той или иной поверхностью.

На этапе предварительных исследований свойств разработанного комплекса численных моделей основное внимание уделялось изучению особенностей локальных аномалий метеорологического режима в непосредственной близости к градирням.

На начальном этапе использования последней модели основное внимание уделялось подбору параметров численной реализации и изучению свойств моделируемого пароконденсатного облака. В связи с тем, что одним из основных результатов в последующем использовании предложенного комплекса моделей является определение суммарного осаждения капель на каждый элемент подстилающей поверхности с пространственной дискретностью $\Delta_s = 50\text{--}100$ м, то для достижения соответствующей статистической значимости получаемого результата общее количество траекторий N_s здесь достаточно принять около 20 тысяч.

В качестве иллюстрации исследования свойств пароконденсатного факела от градирен приведем рис. 3, где представлены расчетные зависимости типичного размера капель и скорости их гравитационной седиментации в зависимости от их первоначальной солености.

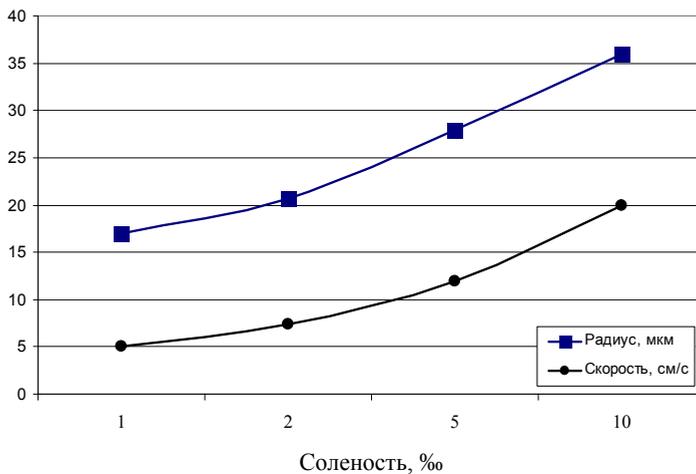


Рис. 3. Расчетная зависимость размеров капель воды в пароконденсатном факеле и скоростей их гравитационной седиментации от солености технической воды градирен. Начальный размер капель на верхнем срезе градирен – 100 мкм

Как можно заметить из анализа полученных результатов, размер капель, а следовательно, и интенсивность их осаждения достаточно сильно зависят от их первоначальной солёности, варьируя от приблизительно 16 мкм при солёности 1 ‰, до 35 мкм при солёности 10 ‰.

Предложенный комплекс моделей требует по своей специфике значительных вычислительных ресурсов, и для обеспечения эффективности его эксплуатации в природоохранной инженерной практике в настоящее время реализован применительно к современным персональным ЭВМ с многоядерными процессорами типа Intel Core, I5 и I7.

Статья подготовлена на основе материалов выполнения поисковой научно-исследовательской работы «Создание численных моделей для решения задач мониторинга и прогнозирования антропогенного загрязнения атмосферы и гидросферы в окрестности действующих и проектируемых объектов ядерной энергетики» в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. по направлению «Мониторинг и прогнозирование состояния атмосферы и гидросферы» в рамках мероприятия 1.3.1 Программы» (конкурс НК-684П).

Литература

1. Баранова М.Е., Гаврилов А.С., Чихачев К.Б. Численная модель расчета солевого загрязнения прибрежной зоны от градиен на морской воде // Мат-лы XXIII Междунар. береговой конф. в честь столетия со дня рождения проф. В.П. Зенковича «Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности». – СПб.: РГГМУ, 2010, с. 173-174.
2. Баранова М.Е., Гаврилов А.С., Скакальский Б.Г., Пресман М.Р. Влияние башенных испарительных градиен ЛАЭС-2 на окружающую среду // Мат-лы науч.-практич. конф. «Научные исследования и инновационная деятельность». – СПб.: Изд. Политех. ун-та, 2009, с. 11-22.
3. Баранова М.Е., Гаврилов А.С. Численное моделирование динамики обтекания турбулентным потоком тонких вертикальных ограждений // Математич. моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. темат. сб. тр., вып. 10 / СПбГАСУ. – СПб., 2004, с. 85-94.
4. Василенко С.В., Гаврилов А.С., Мханна А., Липовицкая И.Н. Моделирование атмосферного пограничного слоя применительно к проблемам климатологии // Межвуз. научн.-методич. сб. «Математич. моделирование, численные методы и комплексы программ». Вып. 13, СПбГАСУ. – СПб., 2006, с. 23–31.
5. Воронов Г.И., Гаврилов А.С. Стохастическое моделирование водно-солевого выброса с поверхности океана // Изв. АН СССР «Физика атмосферы и океана», т. 25, 1989, № 3, с. 318-323.
6. Матвеев Л.Т. Динамика облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
7. Экологический программный комплекс для персональных ЭВМ / Под ред. А.С. Гаврилова. – СПб.: Гидрометеиздат, 1992. – 165 с.
8. Экология и гидрометеорология больших городов и промышленных зон (Россия, Мексика). Монография. Т. 1. Анализ окружающей среды // М.Е. Баранова, А.С. Гаврилов, В.А. Шелутко, В.В. Дмитриев, В.Г. Гутниченко и др. // Под ред. Л.Н. Карлина, В.А. Шелутко. - СПб.: РГГМУ, 2009. – 180 с.
9. Gavrillov A.S. Stochastic modelling of nuclear turbulent diffusion. Diffusion in lowest troposphere // Proceeding of conference "Nuclear Risks, Environmental and Development Cooperation in The North of Europe" (Apatity, June 19-23, 1999), Umeå University, Sweden, 2000, p. 80-84.