

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.501

Процессы тепло- и массообмена между водой и влажным воздухом

Калов Х.М. – академик АМАН, Балкарова С.Б., Калов Р.Х. – член-корреспондент АМАН, Этезова М.Б.

Введение. Исследование процессов тепло- и массопереноса между водой и влажным воздухом важно для изучения различных природных явлений, как конвективные облака, туманы и для решения технических задач: теплотехники, хладотехники и др.

В работе представлены формулы для трех видов расчета: теплового потока, передаваемого конвективным теплообменом q_k ; теплового потока, передаваемого путем массопереноса q_m и лучеиспускания q_l . В различных процессах вклад величины q_k , q_m или q_l в общий тепломассообмен может оказаться несущественным или нулевым. В таких случаях из суммарного тепломассообмена исключается q_i , вклад которого несуществен или равен нулю. Это позволяет упростить расчетные формулы тепло- и массопереноса. В работе приводятся все три вида расчетов, упрощенных этим методом (первый вид, когда $q_k = 0$, второй – когда $q_m = 0$ и третий – $q_l = 0$).

Уравнение тепло- и массообмена и его частные случаи. Исследованию процессов тепло- и массообмена между водой и влажным воздухом, посвящено значительное число публикаций, в которых излагаются результаты как теоретических, так и экспериментальных исследований.

При наличии прямого контакта между воздухом и поверхностью воды будет наблюдаться как тепло-, так и массообмен. Если выделить на поверхности воды элементарную площадку dF , то количество теплоты dQ_τ , которым обмениваются рассматриваемые среды за время τ , можно представить следующей зависимостью

$$dQ_\tau = dQ_{k\tau} + dQ_{m\tau} + dQ_{l\tau}, \quad (1)$$

$dQ_{k\tau} = \alpha \cdot \Delta T \cdot dF \cdot \tau$ – элементарное количество теплоты, передаваемое посредством конвективного теплообмена за время τ ; $dQ_{m\tau} = \sigma \cdot r (d'' - d) \cdot dF \tau$ – элементарное количество теплоты, передаваемое путем массопереноса за время τ ; $dQ_{l\tau} = c \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] dF \cdot \tau$ – элементарное количество теплоты, передаваемое лучистым теплообменом за время τ .

Для теплового потока уравнение (1) примет следующий вид:

$$dQ = dQ_k + dQ_m + dQ_l, \quad (2)$$

где $dQ_k = \alpha \cdot \Delta T \cdot dF$ – элементарный тепловой поток, передаваемый конвективным теплообменом; $dQ_m = \sigma \cdot r (d'' - d) \cdot dF$ – элементарный тепловой поток, передаваемый путем массопереноса; $dQ_l = C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] dF$ – элементарный тепловой поток, передаваемый лучеиспусканием.

Для плотности теплового потока уравнение (2) можно записать следующим образом:

$$q = q_k + q_m + q_l, \quad (3)$$

где $q_k = \alpha \cdot \Delta T$ – конвективная составляющая плотности теплового потока; $q_l = C \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]$ – часть плотности теплового потока, передаваемая лучеиспусканием; $q_m = \sigma \cdot r \cdot (d'' - d)$ – часть плотности теплового потока, передаваемая массопереносом.

В уравнениях (1) - (3) приняты следующие обозначения:

α – коэффициент теплоотдачи; $\Delta T = T_1 - T_2$ – разность между температурами сред, участвующих в теплообмене; F – теплоотдающая поверхность; σ – коэффициент массоотдачи; d'' – влагосодержание насыщенного влажного воздуха; d – влагосодержание ненасыщенного влажного воздуха; r – теплота парообразования; $c = c_0 \cdot \varepsilon$ – коэффициент лучеиспускания поверхности воды; T_1, T_2 – температуры сред, участвующие в теплообмене.

Здесь c_0 – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела; ε – степень черноты поверхности воды.

Уравнение (2) можно преобразовать, используя различные приемы.

Первый способ преобразования уравнения (2).

Вместо dQ_k и dQ_m подставим их значения

$$dQ = \alpha \cdot \Delta T \cdot dF + \sigma \cdot r (d'' - d) dF + dQ_{\text{л}}. \quad (4)$$

Правую часть уравнения (4) преобразуем. Из первого и второго члена вынесем за скобки σ и dF .

$$dQ = \sigma \left[\frac{\alpha}{\sigma} \Delta T + r (d'' - d) \right] dF + dQ_{\text{л}}. \quad (5)$$

Будем считать, что при рассмотрении данного явления соблюдается тройная аналогия. Этот процесс описывается законом Льюиса. Тогда

$$\frac{\alpha}{\sigma} = c_{p'}, \quad (6)$$

где $c_{p'} = c_{p_r} + c_{p_n} \cdot d$ – массовая изобарная теплоемкость влажного воздуха.

Здесь c_{p_r} – изобарная теплоемкость сухой части влажного воздуха; c_{p_n} – массовая изобарная теплоемкость водяного пара.

С учетом соотношения (6) уравнение (5) запишем следующим образом:

$$dQ = \sigma [c_{p'} \cdot \Delta T + r (d'' - d)] dF + dQ_{\text{л}}. \quad (7)$$

Термодинамические параметры влажного воздуха взаимосвязаны следующими выражениями:

$$r = r_0 \cdot (c_{\text{ж}} - c_{p_n}) t_{\text{в}}; \quad (8)$$

$$i = c_{p_r} \cdot t_r + r_0 \cdot d + c_{p_n} \cdot t_r \cdot d; \quad (9)$$

$$i'' = c_{p_r} \cdot t_{\text{в}} + r_0 \cdot d'' + c_{p_n} \cdot t_{\text{в}} \cdot d''. \quad (10)$$

где $r_0 = 2500$ кДЖ/кг – теплота парообразования воды при $t = 0^\circ$; i – энтальпия ненасыщенного влажного воздуха; i'' – энтальпия насыщенного влажного воздуха; $c_{\text{ж}}$ – массовая теплоемкость воды; t_r – температура газа за пределами теплового и диффузионного пограничных слоев; $t_{\text{в}}$ – температура воды.

С учетом уравнений (8) – (10) зависимость (7) можно записать в виде:

$$dQ = \sigma [(i'' - i) - (d'' - d) c_{\text{ж}} \cdot t_{\text{в}}] dF + dQ_{\text{л}} \quad (11)$$

или

$$dQ = \sigma (i'' - i) dF - c_{\text{ж}} \cdot t_{\text{в}} \cdot dM + dQ_{\text{л}}, \quad (12)$$

где

$$dM = \sigma (d'' - d) dF.$$

Уравнение (12) может быть приведено к виду

$$dQ = A\sigma (i'' - i) dF + dQ_{\text{л}}, \quad (13)$$

где

$$A = 1 - \frac{c_{\text{ж}} t_{\text{в}} dM}{(i'' - i) dF}.$$

По данным [1, 2] можно считать, что для воздухоохладителей $A = 1$, тогда уравнение (13) примет вид

$$dQ = \sigma (i'' - i) dF + dQ_{\text{л}}. \quad (14)$$

Ориентировочные значения A , рекомендуемые для расчета по данным [2] приведены ниже в виде таблицы:

Таблица

$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	35
A	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94

Если экстраполировать последние данные в сторону понижения температуры $t_{\text{в}}$, то при $t_{\text{в}} = 5^\circ\text{C}$ $A = 1$.

При постоянстве параметров и величин, характеризующих процесс тепло- и массопереноса между водой и влажным воздухом, интеграл уравнения (14) будет равен

$$Q = \sigma (i'' - i) F + Q_{\text{л}}. \quad (15)$$

Если роль лучистой составляющей теплового потока невелика, то ее в ряде случаев можно и не учитывать. Тогда уравнение (15) примет вид

$$Q = \sigma (i'' - i) F. \quad (16)$$

Уравнение (2) возможно преобразовать и по-другому, а именно

$$dQ = \alpha \cdot \Delta T dF + dQ_{\text{м}} + c \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] dF \quad (17)$$

или

$$dQ = \alpha_{\text{об}} \cdot \Delta T dF + dQ_{\text{м}}, \quad (18)$$

где

$$\alpha_{\text{об}} = \alpha + \alpha_{\text{л}}. \quad (19)$$

Здесь

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{c \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\Delta T}. \quad (20)$$

Привлекательность такой записи в виде уравнений (17) – (20) состоит в том, что численные значения выражения $\frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{\Delta T}$ приводятся в таблицах.

При постоянстве параметров и величин, характеризующих тепло- и массоперенос, уравнение (18) можно преобразовать следующим образом

$$Q = \alpha_{\text{об}} \cdot \Delta T F + Q_{\text{м}}. \quad (21)$$

Если составляющая теплового потока, обусловленная массопереносом невелика, и ее в пределах точности используемых зависимостей можно не учитывать, то уравнение (21) примет вид

$$Q = \alpha_{об} \cdot \Delta T \cdot F. \quad (22)$$

При рассмотрении этой же задачи по отношению к массопереносу, осложненному теплообменом, решение будет выглядеть иначе.

Вырежем из объема влажного воздуха, размещенного в пределах диффузионного пограничного слоя, элементарный параллелепипед со сторонами dx , dy , dz и ориентируем его в прямоугольной системе координат (рис. 1).

Рассматривается случай, когда имеется молекулярная диффузия и термодиффузия. Бародиффузия отсутствует. Концентрация пара на левой грани (1–2–3–4) C , а температура t .

Здесь C – объемная концентрация отношение массы водяного пара (M_n) к объему, занимаемому ею (V), $C = \frac{M_n}{V}$.

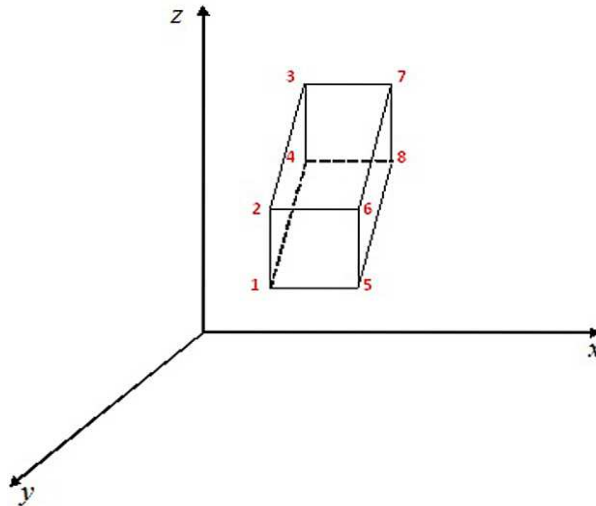


Рис. 1. К выводу дифференциального уравнения массопереноса, осложненного теплообменом

В соответствии с 1-ым законом Фика и соотношениями, определяемыми термодиффузией, через левую грань параллелепипеда в направлении оси x в рассматриваемое тело за время $d\tau$ поступает масса

$$\delta M_x = -D \frac{\partial C}{\partial x} dy dz d\tau - \rho \frac{D_T}{T} \frac{\partial t}{\partial x} dy dz d\tau, \quad (23)$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии; ρ – плотность; D_T – коэффициент термодиффузии.

На правой грани параллелепипеда (5–6–7–8) температура $t + \frac{\partial t}{\partial x} dx$, а концентрация $C + \frac{\partial C}{\partial x} dx$.

Через правую грань рассматриваемого тела пройдет масса

$$\delta M_{x+dx} = -D \frac{\partial (C + \frac{\partial C}{\partial x} dx)}{\partial x} dy dz d\tau - D_T \frac{\rho}{T} \frac{\partial (t + \frac{\partial t}{\partial x} dx)}{\partial x} dy dz d\tau, \quad (24)$$

где D и D_T постоянны, т.е. считаем, что в рассматриваемом теле не происходит деформации геометрических размеров.

Используя уравнения (23) и (24), получим выражение для массы пара, поступившей в параллелепипед.

$$dM_x = \delta M_x - \delta M_{x+dx} = -D \frac{\partial C}{\partial x} dy dz d\tau - \rho \frac{D_T}{T} \frac{\partial t}{\partial x} dy dz d\tau + \\ + D \frac{\partial(C + \frac{\partial C}{\partial x} dx)}{\partial x} dy dz d\tau + D_T \frac{\rho}{T} \frac{\partial(t + \frac{\partial t}{\partial x} dx)}{\partial x} dy dz d\tau \quad (25)$$

или

$$dM_x = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} dx dy dz d\tau + D_T \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx dy dz d\tau. \quad (26)$$

Рассуждая аналогично, получим составляющие количества массы, поступившие в рассматриваемое тело по осям y и z .

$$dM_y = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} dx dy dz d\tau + D_T \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} dx dy dz d\tau, \quad (27)$$

$$dM_z = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} dx dy dz d\tau + D_T \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} dx dy dz d\tau. \quad (28)$$

Общее количество массы, поступившей в рассматриваемое тело, можно получить, сложив уравнения (26)–(28)

$$dM = dM_x + dM_y + dM_z$$

или

$$dM = \left(D \nabla^2 C + D_T \frac{\rho}{T} \nabla^2 t \right) dv d\tau, \quad (29)$$

где

$$\nabla^2 C = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}; \quad \nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}; \quad dv = dx \cdot dy \cdot dz.$$

При получении уравнения (29) предполагалось отсутствие лучистого теплопереноса.

Рассуждая аналогично, можно получить уравнение для количества массы при наличии бародиффузии:

$$dM = \left(D \nabla^2 C + D_T \frac{\rho}{T} \nabla^2 t + D_P \frac{\rho}{P} \nabla^2 P \right) dv d\tau, \quad (30)$$

D_P – коэффициент бародиффузии; ρ – общее давление смеси; $\nabla^2 P = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}$.

При получении уравнения (30) предполагалось постоянство коэффициента бародиффузии и соблюдались все те допущения, о которых шла речь выше, то есть при получении уравнения (29).

Заключение. Представлена общая формула расчета (2) тепло- и массообмена между водой и влажным воздухом, включающая конвективный теплообмен, массоперенос и тепловое излучение.

В случае если тепловое излучение невелико и его можно не учитывать, уравнение тепло- и массообмена принимает упрощенный вид (16). Если же составляющая теплового потока обусловленная массопереносом невелика и ею можно пренебречь, то уравнение теплового потока имеет простой вид (22).

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов С.Н., Бучко Н.А., Гуйго Э.И. и др. Теоретические основы хладотехники. Тепло-массообмен. / Под редакцией Гуйго Э.И. М.: Агропромиздат, 1986. 320 с.
2. Теоретические основы получения искусственного холода. Справочник. Холодильная техника. / Под редакцией Быкова А.В. М.: Пищевая промышленность, 1980. 232 с.

ABSTRACT

Variants of the calculation formulas of heat and mass transfer in the processes of convective and radiant heat transfer and mass transfer between water and humid air are given, taking into account the contribution of each of these processes. Simplified calculation formulas for the following variants are obtained:

- the amount of heat transmitted by the radiant heat exchanger is small or can be neglected;
- the heat flow transmitted by the convective heat exchanger is not significant;
- mass transfer has little effect on heat transfer.

Keywords: heat transfer, mass transfer, humid air, convective heat transfer, radiant heat transfer, radiating coefficient.

¹High-mountain geophysical institute, Nalchik; ruslan_kalov@mail.ru;

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov", Nalchik

© Kh.M. Kalov¹,
R.Kh. Kalov¹,
S.B. Balkarova²,
M.B. Etezova², 2019

АННОТАЦИЯ

Приводятся варианты расчетных формул тепло- и массообмена в процессах конвективного и лучистого теплообмена и массопереноса между водой и влажным воздухом с учетом величины вклада каждого из этих процессов. Получены упрощенные расчетные формулы для следующих вариантов:

- количество теплоты, передаваемое лучистым теплообменом, мало или им можно пренебречь;
- тепловой поток, передаваемый конвективным теплообменом, не существенен;
- массоперенос мало влияет на передачу тепла.

Ключевые слова. теплообмен, массообмен, влажный воздух, конвективный теплообмен, лучистый теплообмен, коэффициент излучения

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение "Высокогорный геофизический институт" Росгидромета, Нальчик; ruslan_kalov@mail.ru;

²ФГБОУ ВО "Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова", Нальчик

© Х.М. Калов¹,
Р.Х. Калов¹,
С.Б. Балкарова²,
М.Б. Этезова², 2019