

А. А. ДАЯН

ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НАД ВОДОЕМОМ ПРИ НАЛИЧИИ МОНОСЛОЯ. СОКРАЩАЮЩЕГО ИСПАРЕНИЕ

Под трансформацией воздушного потока подразумевают изменение его характеристик (температура, влажность, скорость движения и т. д.) под влиянием подстилающей поверхности, например, при переходе воздушного потока с суши на водоем. Причиной трансформации является изменение гидродинамических (шероховатость) и теплофизических (температура) характеристик подстилающей поверхности.

Метеохарактеристики над сушей можно рассматривать как некоторые начальные «характеристики» процесса, а характеристики над водоемом можно рассматривать как трансформированные метеохарактеристики суши. Поэтому, между указанными характеристиками можно установить определенные соотношения, которые имеют теоретическое и прикладное значение.

Если поверхность водоема покрыта монослоем, трансформация количественно отличается от случая, когда поверхность свободна (1).

Это объясняется тем, что при наличии монослоя изменяются шероховатость и температура поверхности воды.

Для количественного описания процесса трансформации необходимо учесть процессы тепло- и влагообмена и обмена количеством движения, так как эти процессы определяют изменения температуры, влажности и скорости движения воздушного потока.

Для исследования изменения влажности используется уравнение переноса влаги в атмосфере, для температуры — уравнение притока тепла, а для изменения скорости ветра — уравнение движения. К ним присоединяется и уравнение неразрывности. Получается следующая система из четырех уравнений для определения четырех неизвестных функций:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \nu \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \\ \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + w \frac{\partial q}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial q}{\partial z} \right) + \nu \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь ось ox направлена по воздушному потоку, oz — вертикально вверх. Начало координат находится на береговой линии. Предположено,

что нет изменений по оси oy , поэтому в уравнениях отсутствуют производные по y .

u, w, θ, q — соответственно горизонтальная и вертикальная компоненты скорости, температура и влажность воздушного потока, — неизвестные функции, подлежащие определению;

k, ν — коэффициенты вертикального и горизонтального турбулентного обмена, причем считается, что коэффициенты турбулентности для разных субстанций (количества движения, тепла и водяного пара) одинаковы, что неоднократно доказывалось многими авторами [2, 3 и др.].

Рассмотрим прямоугольную область

$$\begin{array}{ll} -L \leq x \leq L & -L \leq x < 0 \quad \text{суша} \\ 0 \leq z \leq H & 0 < x \leq L \quad \text{вода} \end{array}$$

Тогда граничные условия задачи будут:

1. при $x = -L$ $u = u_0(z), \quad \theta = \theta_0, \quad q = q_0$
2. при $x = L$ $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial x} = 0$
3. при $z = 0$ $u = w = 0, \quad \theta = \theta(x), \quad q - \alpha \frac{\partial q}{\partial z} = q_0$ (2)
4. при $z = H$ $u = u(H) \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial q}{\partial z} = 0$

Здесь q_0 — значение влажности над сушей, на водной поверхности для влажности ставится условие, учитывающее наличие монослоя [5]. В этом условии $\alpha = \frac{k\nu}{A}$, $A = \frac{\gamma_0 P_0}{0.622 \sqrt{2\pi M R T}}$, где μ — молекулярный вес водяного пара; P_0 — атмосферное давление; M — масса моля; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; γ_0 — коэффициент accommodations, который характеризует физико-химические свойства испаряющейся поверхности.

Для чистой водной поверхности $\alpha = 0$ и это условие превращается в общепринятое

$$q = q_0$$

где q_0 — влажность насыщения водяного пара, определяемая по температуре поверхности воды.

Для распределения температуры на поверхности воспользуемся выражением, предложенным А. М. Мхитаряном [4].

$$\theta(x) = (2.8 - 2.2 \operatorname{th} \varepsilon x) \sin \omega t \quad \text{при } z = 0$$

$$\theta(x) = (3.5 - 1.5 \operatorname{th} \varepsilon x) \sin \omega t \quad \text{при } z \neq 0$$

Зададим $k(x, z)$ в виде степенной функции

$$k = k_1(x) \left(\frac{z}{z_1} \right)^{1-p}$$

где $k_1(x)$ — коэффициент турбулентного обмена на высоте z_1 . Параметр p зависит от шероховатости поверхности $p(z_0)$ и принимает следующие значения:

суша		вода		
z_0	p_i	z_0	p	
10^{-2} м	0.15	10^{-4} м	0.08	$\alpha = 0$
10^{-3} м	0.11	10^{-6} м	0.05	$\alpha \neq 0$

Система (1) решается методом дробных шагов [6]. После расщепления вместо одной системы (1) получаем две подсистемы, в каждой из которых содержатся производные только по одной пространственной переменной (x или z):

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial t} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \frac{\partial \theta}{\partial t} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial t} + w \frac{\partial q}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial q}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} &= \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} &= \nu \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} &= \nu \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Эти две подсистемы запишем в общем виде

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + a \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} = \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(k \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} \right) \quad (5)$$

где

$$\varphi = \begin{cases} u \\ \theta \\ q \end{cases} \quad \zeta = \begin{cases} z & \text{для (3)} \\ x & \text{для (4)} \end{cases} \quad a = \begin{cases} w & \text{для (3)} \\ u & \text{для (4)} \end{cases}$$

После замены производных конечными разностями получается уравнение:

$$\varphi_{i+1} - B_i \varphi_i + C_i \varphi_{i-1} = -F_i \quad (6)$$

Полученная система алгебраических уравнений решается методом прогонки. Решение имеет следующий вид:

$$\tau_i = \frac{\beta_{i+1}\tau_{i+1} + Z_{i+1}}{C_{i+1}} \quad (7)$$

$$Z_{i+1} = \beta_{i+1}(Z_i + F_i) \quad (8)$$

$$\beta_{i+1} = \frac{C_{i+1}}{B_i - \beta_i} \quad (9)$$

Важное значение имеет выбор шагов.

В процессе трансформации самые существенные изменения происходят вблизи береговой линии ($x=0$) и у поверхности ($z=0$).

Поэтому вблизи них надо брать мелкие шаги.

При удалении от берега и от поверхности на некоторое расстояние процесс устанавливается. Поэтому шаги по вертикали и по горизонтали взяты переменные. Вблизи $x=0$ и $z=0$ взяты наименьшие шаги. При удалении от берега и от поверхности до некоторого расстояния шаги увеличиваются, после чего полагаются постоянными.

$$\Delta z_n = 2^{n-1} \Delta z_1 \quad \Delta z_1 = 0.0625 \quad \text{до } n = 8$$

$$\text{при } n > 8 \quad \Delta z = 8 \quad \text{до } n = 24$$

$$\Delta x_m = r^{m-1} \Delta x_1$$

$$\Delta x_1 = 50 \quad r = 1, 2 \quad \text{до } m = 17$$

$$\text{при } m > 17 \quad \Delta x = 250 \quad \text{до } m = 32$$

Результаты численного решения

Коэффициент α , как уже говорилось, учитывает физико-химические характеристики монослоя. При $\alpha=0$ поверхность водоема свободна от монослоя. Сделаны расчеты для следующих значений $\alpha=0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 1.0$. При этом $v=5$ м²/сек. На фиг. 1 приведены графики, показывающие распределение влажности по высоте для трансформированного потока при различных монослоях.

Как и следовало ожидать, влажность (следовательно, и испарение) наибольшая в случае $\alpha=0$, в случае $\alpha=1$ влажность (испарение)—наименьшая.

Введем величину — меру трансформации — τ_q .

$$\tau_q = \frac{q(x) - q_0}{q_n - q_0}$$

Значения q_0 и q_n берутся из граничных условий, $q_0 = 13$ мб, $q_n(x)$ — по формуле Магнуса.

В табл. 1 приведены значения τ_q на разных высотах при различных значениях α . Как видно, трансформация наибольшая, когда поверхность

Таблица 1

Изменение меры трансформации ε_0 при различных значениях α на разных высотах и расстояниях от берегового уреза

x, км	$\alpha, \%$											
	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	0,125	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0
	$\alpha = 0$						$\alpha = 0,1$					
1	0,20	0,13	0,08	0,05	0,04	0,02	0,17	0,09	0,06	0,03	0,03	0,01
2	0,31	0,20	0,13	0,09	0,05	0,04	0,23	0,14	0,09	0,05	0,04	0,03
3	0,37	0,24	0,15	0,11	0,08	0,06	0,28	0,18	0,12	0,07	0,06	0,04
4	0,40	0,27	0,17	0,13	0,09	0,06	0,30	0,19	0,13	0,08	0,07	0,05
5	0,40	0,28	0,19	0,14	0,10	0,07	0,31	0,20	0,14	0,10	0,08	0,06
6	0,41	0,28	0,21	0,14	0,11	0,08	0,32	0,21	0,15	0,11	0,09	0,06
7	0,41	0,29	0,22	0,15	0,12	0,08	0,32	0,22	0,16	0,11	0,09	0,07
10	0,42	0,30	0,22	0,17	0,13	0,11	0,33	0,23	0,17	0,12	0,09	0,08
	$\alpha = 0,3$						$\alpha = 0,5$					
1	0,11	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,15	0,10	0,06	0,04	0,02	0,00	0,11	0,06	0,04	0,02	0,00	0,00
3	0,17	0,12	0,08	0,05	0,03	0,00	0,13	0,08	0,06	0,03	0,01	0,00
4	0,19	0,13	0,09	0,06	0,03	0,00	0,14	0,08	0,06	0,03	0,01	0,00
5	0,20	0,14	0,10	0,07	0,04	0,00	0,14	0,09	0,07	0,04	0,02	0,00
6	0,20	0,14	0,10	0,07	0,05	0,00	0,15	0,11	0,07	0,04	0,03	0,00
7	0,21	0,14	0,10	0,08	0,05	0,00	0,16	0,11	0,07	0,05	0,04	0,00
10	0,22	0,16	0,11	0,09	0,06	0,00	0,17	0,12	0,09	0,06	0,05	0,00

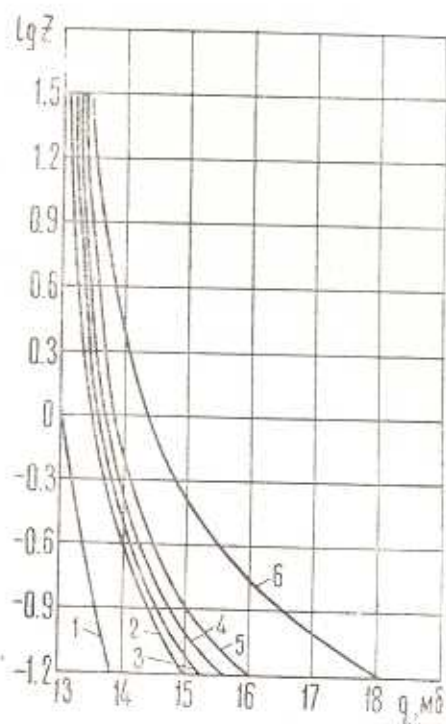
воды не покрыта монослоем. При наличии же монослая чем больше сокращение испарения, тем меньше мера трансформации влажности. Трансформация влажности кончается на расстоянии 2—3 км от берега, когда $\alpha=0$. При наличии монослая процесс трансформации завершается ближе к берегу. Полученные результаты подтверждаются данными наблюдений [1]. Изменение значения влажности непосредственно над водной поверхностью в зависимости от значений α показано на графике (фиг. 2), где

$$\varepsilon_{0n} = \frac{q(z) - q_0}{q_n - q_0}$$

При расчетах трансформации температуры получились следующие результаты. Графики на фиг. 3 показывают распределение температуры на разных высотах соответственно для случаев $\alpha=0; 0,3; 0,5$:

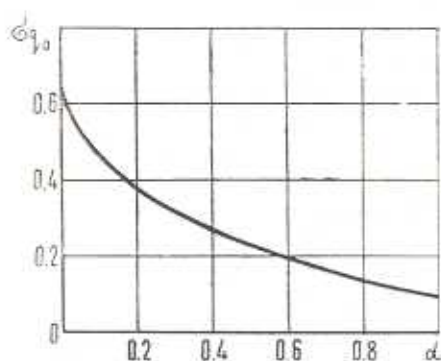
На графиках видно повышение температуры над водной поверхностью, причем чем больше α , тем больше повышение температуры.

Графики на фиг. 4 показывают распределение температуры по высоте на разных расстояниях от берега.



Фиг. 1. Распределение влажности трансформированного потока по высоте при различных значениях.

1— $\alpha=1$, 2— $\alpha=0.5$, 3— $\alpha=0.3$, 4— $\alpha=0.2$, 5— $\alpha=0.1$, 6— $\alpha=0$



Фиг. 2. Изменение величины σ_{qa} в зависимости от значений α .

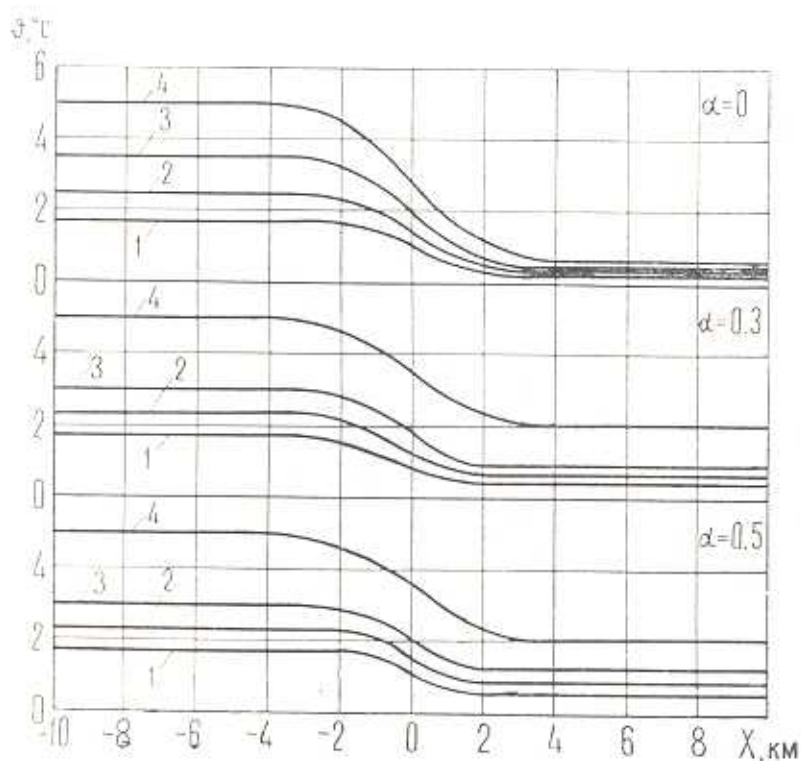
Расчеты показывают, что трансформация горизонтальной скорости завершается ближе к берегу, когда монослой существует, а когда поверхность воды свободна от нее, процесс трансформации завершается дальше от берега.

В табл. 2 приведены значения $z_a = [u(x) - u_0] / [u_\infty - u_0]$, где значение горизонтальной скорости на берегу, на высоте 1 м, u_∞ — значение скорости трансформированного потока на той же высоте.

Таблица 2

Изменение значений z_a на высоте 1 м на разных расстояниях от берега для двух значений x

x, км	x=0			x=0.5		
	u(x)	u(x)-u_0	z_a	u(x)	u(x)-u_0	z_a
0.0	2.00	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00
0.5	2.70	0.70	0.50	2.96	0.96	0.60
1.0	3.00	1.00	0.71	3.28	1.28	0.80
3.0	3.30	1.30	0.93	3.44	1.44	0.90
6.0	3.40	1.40	1.10	3.60	1.60	1.00

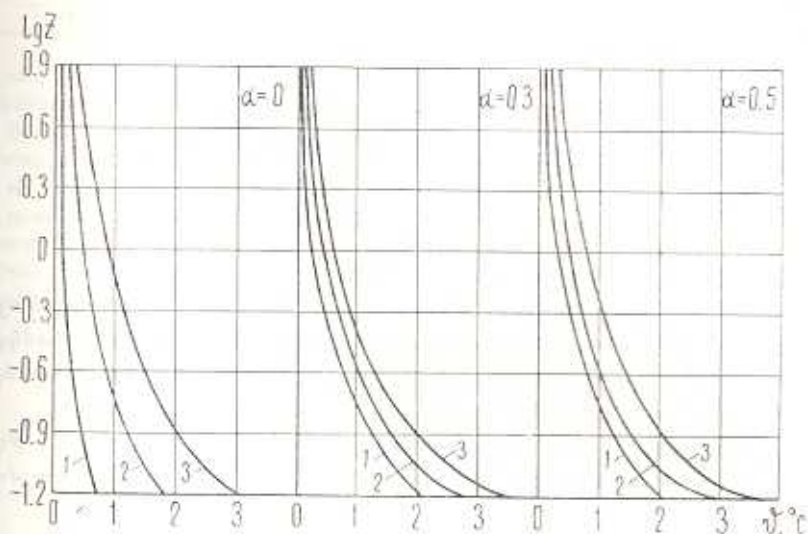


Фиг. 3. Распределение температуры по горизонтали на разных высотах при различных значениях α .

1— $z=0.5$ м, 2— $z=0.25$ м, 3— $z=0.125$ м, 4— $z=0$ м.

Теперь попытаемся путем изучения особенностей процесса трансформации воздуха под влиянием водной поверхности при наличии монослая и без нее приблизительно оценить экономию испарения.

С этой целью обратимся к фиг. 1, где приведены профили $q(z, \alpha)$.



Фиг. 4. Распределение температуры по высоте на разных расстояниях от берега при различных значениях α .

1— $x=1$ км, 2— $x=0.5$ км, 3— $x=0$ км

Если испарение чистой воды равно площади, заключенной между кривыми $q(z, 0)$ и $q_0(z)$, то эффект сокращения испарения при наличии монослоя можно оценить площадью, заключенной между кривыми $q(z, 0)$ и $q(z, \alpha)$. Следовательно, экономия испарения в зависимости от α в процентах будет:

$$\Theta(\alpha) = \frac{\int_0^{\delta} |q(z, 0) - q(z, \alpha)| dz}{\int_0^{\delta} |q(z, 0) - q_0(z)| dz} \cdot 100\%$$

Ограничиваясь восьмиметровым слоем ($\delta=8$ м) воздушного потока над водной поверхностью и используя данные, приведенные на фиг. 1, приближенно рассчитана экономия испарения в зависимости от α в %.

α	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	1.0
$\Theta(\alpha)$	16	27	41	50	57	64	88

Отсюда видно, что чем больше значение α , тем больше получается и экономия испарения.

ՕԳԱՅԻՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ՏՐԱՆՏՖՈՐՄԱՅԻԱՆ ՋՐԱՄԲԱՐԻ ՎՐԱ՝
ԳՈՒՐՇԵԻԱՅՈՒՄԸ ԿՐՃԱՏՈՂ ԹԱՂԱՆԹԱՇԵՐՏԻ
ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՆ ԳԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ու ռ մ

Հոգվածում ուսումնասիրվում է օդային հոսանքի տրանսֆորմացիան, երբ այն անցնում է ցամաքից ջրամբարի վրայով: Եթե ջրամբարը ծածկված է միամոլեկուլյար թաղանթով, տրանսֆորմացիան քանակապես տարբերվում է այն դեպքից, երբ ջրի մակերևույթը ազատ է որևէ ծածկույթից:

Հիդրոդինամիկայի հավասարումների (1) սխեմա լուծվում է թվային մեթոդով: Թաղանթի անկայությունը հաշվի է առնվում եզրային պայմաններում:

Հաշվումները իրականացվել են ԲԷՍՄ—6 էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի վրա:

Հաշվումները ցույց են տալիս, որ երբ ջրի մակերևույթը ծածկված չէ թաղանթով տրանսֆորմացիայի երևույթը ավարտվում է ավից ավելի մեծ հեռավորության վրա, քան այն դեպքում, երբ մակերևույթը ծածկված է թաղանթով:

Երբ ջրի մակերևույթը ծածկված է թաղանթով, բարձրանում է օդի շերտատիճանը ջրամերձ շերտում: Ինչքան մեծ է զոլորշիացման կրճատումը, այնքան մեծ է շերտատիճանի բարձրացումը:

Գնահատվում է զոլորշիացման սնտեսումը, տարբեր թաղանթների դեպքում:

TRANSFORMATION OF AIR FLOW OVER BASIN IN THE
PRESENCE OF MONOLAYER REDUCING EVAPORATION

L. A. DAYAN

S u m m a r y

Transformation of humidity, temperature and velocity of motion of air flow is examined on its transition from land into basin in the presence of a monomolecular film. By studying the peculiarities of the process of air transformation, the economy of evaporation is approximately evaluated.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Мухтарян А. М., Давтянцян М. Г., Зорян З. А., Петросян Н. А.: О возможности оценки эффективности монослоев, снижающих испарение с водной поверхности. Систем изучения трансформации влажности воздушного потока. Докл. АН Арм. ССР, т. XV, № 2, 1967.

2. Будыко М. П. Испарение в естественных условиях. Гидрометеонздат, Л., 1948.
3. Мхитарян А. М. Некоторые вопросы гидродинамики пограничного слоя атмосферы. Водный и тепловой балансы водоемов. Изд. «Айастан», Ереван, 1970.
4. Мхитарян А. М. О бризах в бассейнах оз. Севан и некоторые результаты их расчета по фактическому распределению температуры подстилающей поверхности (сообщение I и II). Изв. АН Арм. ССР, сер. техн. наук, т. XV, № 5, 6, 1962.
5. Тилофеев М. П. Метеорологический режим водоемов. Гидрометеонздат, Л., 1963.
6. Катков В. А. О решении задач мезометеорологии численными методами. Метеорология и гидрология, № 7, 1965.