

Л. А. БУКИНА, С. Р. ИКОННИКОВА

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ПРИ НАТЕКАНИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ВОДОЕМ ПРИ НЕБОЛЬШИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ БЕРЕГА

Описывается экспериментальная установка авторов на Рыбинском водохранилище для исследования полей скорости и температуры на небольших расстояниях от берега. Приводятся данные о температуре воды и воздуха за период с 3 по 8 августа 1969 г. в прибрежной зоне Рыбинского водохранилища и данные об изменении температуры воздуха на высоте 2 м от поверхности воды в зависимости от расстояния от берега для трех условий температурной стратификации. Полученные результаты сопоставляются с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

Метеорологические условия вблизи любой водной поверхности определяются приходо-расходом радиационной энергии и теплообменом поверхности воды с атмосферой. В отличие от морей и океанов эти условия над ограниченными водоемами зависят также от метеорологических условий над окружающей водоем суши. Влияние суши на водоем в общем случае имеет сложный и разнообразный характер. Оно состоит в том, что воздух над окружающей водоем суши под влиянием тепло- и влагообмена изменяет свои основные характеристики, к которым относятся температура, влажность, скорость при движении над водоемом. В итоге создается характерный для водоема режим.

Задачи об изменении полей ветра, температуры и влажности, происходящих при трансформации воздушной массы, в различных постановках решались многими авторами. Вопрос о трансформации воздуха над ограниченными водоемами наиболее полно и всесторонне исследован в [1]. Для количественного описания изменения температуры воздуха при переходе его с суши на водоем в [1] решено уравнение теплопроводности и получено сравнительно простое выражение для изменения температуры воздуха под влиянием водоемов:

$$T_{xz} = T_{0z} + (T_n - T_{0z}) F \left(\frac{1}{L}, 2\rho \right), \quad (1)$$

где T_{0z} — начальная температура воздуха на границе раздела вода—

суша, T_{xz} — температура воздуха после трансформации над поверхностью водоема, T_n — температура поверхности воды,

$$F\left(\frac{1}{L}, 2\rho\right) = \frac{1}{\Gamma(\rho)} \int_{1/2L}^{\infty} e^{-\sigma} \sigma^{\rho-1} d\sigma, \quad (2)$$

$$L = \frac{\frac{k}{u} x}{2(1-2\rho)^2 z^{1-2\rho} \frac{1}{z^{1-2\rho}}},$$

где x — расстояние исследуемой точки от уреза воды, z — высота исследуемой точки от поверхности воды, $\rho = \frac{n}{1+2n}$, n — показатель степени

в степенном законе изменения скорости ветра с высотой, k — коэффициент турбулентности на высоте z , u — скорость ветра на той же высоте. Функция (2) вычисляется по таблицам Слуцкого [2].

Формула (1) в основном правильно описывает экспериментально исследованные закономерности, которые заключаются в следующем: температура воздуха наиболее интенсивно изменяется на начальном отрезке пути воздуха над водоемами, затем изменения происходят медленнее. Изменения температуры существенно зависят от начальной температуры воздуха. Изменения эти тем больше, чем выше температура поверхности воды. При неустойчивой стратификации при расстоянии от берега свыше 1 км изменения температуры над водоемом будут меньше, чем при устойчивой стратификации.

Однако наряду с экспериментальными данными [3, 4, 5] имеются и противоречащие результаты [6, 7]. Зайцев и Серова [6] исследовали трансформацию воздушного потока на Валдайском озере весной и летом 1962 г. при небольших расстояниях от берега. Рассчитанный ими по материалам наблюдений график функции $F = \frac{T_{xz} - T_{0z}}{T_n - T_{0z}}$ в зависимости от расстояния, проходимого воздушным потоком от берега, показывает, что при равновесных условиях над сушей и устойчивой стратификации над водной поверхностью график функции F хорошо согласуется с кривой, рассчитанной по формуле (2) при $k/u = 0,033$ м. В условиях же неустойчивой стратификации над сушей и устойчивой стратификации над водной поверхностью совпадение экспериментальных и теоретических кривых наблюдается лишь при расстояниях от берега свыше 500 м. На расстоянии от берега 50 м экспериментальная кривая имеет резко выраженный максимум, а сами значения F , рассчитанные по материалам наблюдений, на порядок превышают теоретические величины. Новожилова [7] проводила расчеты среднедекадной температуры воздуха над водной поверхностью Новосибирского водохранилища по данным береговых станций по формуле Тимофеева [1] и сравнивала полученные значения с данными натурных измерений. В результате она делает вывод, что предложенный Тимофеевым метод расчета температуры может быть использован только для озерной части Новосибирского водохранилища, где расстояния от берега велики. Новожилова говорит, что попытка произвести такой же расчет для речной части водохранилища хороших результатов не дала.

Для выявления влияния суши на формирование метеорологического режима водоемов и получения некоторых характеристик, определяющих этот режим, летом 1969 г. на Рыбинском водохранилище

были проведены измерения вертикальных профилей ветра и температуры воздуха и воды в трех точках на расстоянии 5, 75 и 150 м от берега в одном створе. В этих точках датчики скорости ветра и температуры крепились на нескольких горизонтах на вехах (рис. 1). В каче-

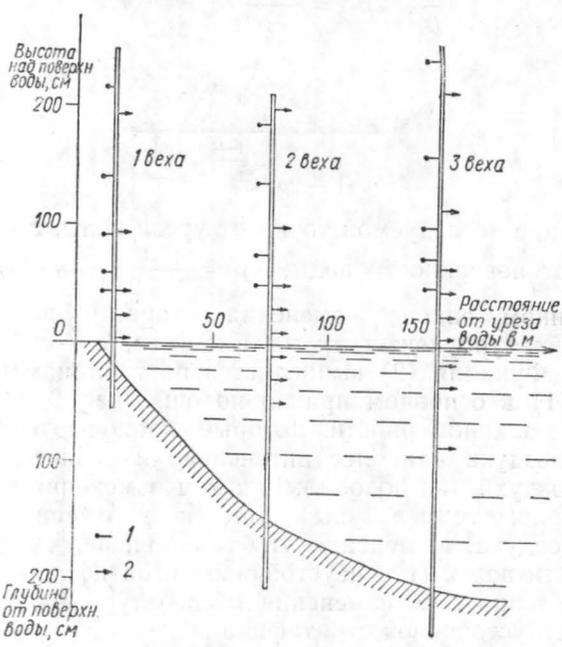


Рис. 1. Схема расположения вех с установленными на них датчиками температуры и анемометрами: 1 — уровень крепления анемометров, 2 — уровень крепления датчиков температуры

стве датчиков скорости ветра использовались трехчашечные контактные анемометры. Регистрация скорости ветра производилась кимографом. Датчиками температуры служили полупроводниковые термометры сопротивления типа МТ-54. Регистрация температуры производилась по стандартной мостовой схеме. Точность измерения температуры при этом составляла $0,05^\circ$.

Измерения скорости ветра и температуры воздуха и воды проводились круглосуточно. Регистрация температуры на каждой вехе проводилась через 2—3 час в течение 5—10 мин. Запись скорости ветра кимографом проводилась непрерывно. Обработка производилась при ветре с берега на водохранилище, и угол между направлением ветра и направлением вех не превышал 45° . За период наблюдений (с 3 по 8 августа) происходило постепенное повышение среднесуточной температуры воздуха. На расстоянии 150 м от берега и на высоте 2 м от поверхности воды среднесуточная температура изменилась от 12 до 16° . Амплитуда суточных колебаний температуры воздуха на третьей вехе на той же высоте от поверхности воды изменилась в среднем от $1,5^\circ$ (3 августа) до 5° (8 августа). Среднесуточная температура воды на третьей вехе за тот же период изменилась в среднем на $1,5^\circ$. Амплитуда суточных колебаний воды не превышала 1° . Средняя температура воды на третьей вехе 3 августа была около 14° . Амплитуда суточных колебаний температуры воздуха заметно уменьшается с удалением от берега.

При ветре, дующем с берега, с удалением от берега температура воздуха, так же как и в [8], как правило, понижается. Скорость изменения температуры зависит как от температуры на урзе воды, так и от условий температурной стратификации. На рис. 2, а показаны графики изменения температуры воздуха на высоте 2 м

от водной поверхности в зависимости от расстояния от берега для трех условий температурной стратификации на расстоянии 150 м от берега. Критерий температурной устойчивости вычислялся по формуле Ричардсона: $Ri = \frac{g}{T} \frac{\Delta T}{u^2} \Delta z$, где $g=9,81$ м/сек² — ускорение силы тяжести, T — абсолютная температура воздуха на высоте $\Delta z=2$ м от поверхности воды, U — скорость ветра на той же высоте, $\Delta T=T_n-T_{xz}$ — разность между температурой поверхности воды и температурой воздуха на высоте 2 м от поверхности воды. За среднюю температуру поверхности воды принята температура воды на глубине около 50 см, как это обычно делается при гидрологических исследованиях. Стратификация считалась устойчивой, если $Ri \leq -0,002$, нейтральной при $-0,002 < Ri < 0,002$ и неустойчивой при $Ri \geq 0,002$.

№ кривых	$T_{n150}-T_{0z}$	$T_{n75}-T_{0z}$
1	-4,8	-4,1
2	-2,5	-1,9
3	-1,4	-0,5
4	1,0	1,6
5	1,2	1,9
6	2,6	2,7
7	4,9	5,9

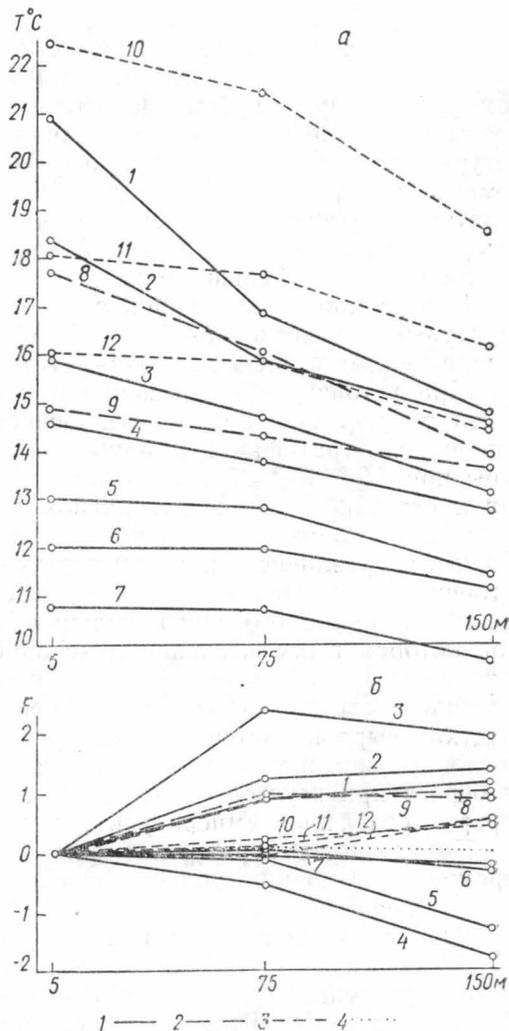


Рис. 2. Зависимость температуры воздуха на высоте 2 м от поверхности воды от расстояния от берега (а), зависимость функции F от расстояния от берега для трех условий температурной стратификации (б). 1 — неустойчивая, 2 — нейтральная, 3 — устойчивая стратификация, 4 — теоретическая кривая

Всего было обработано 45 серий наблюдений, но большинство из представленных на рис. 2 кривых получено осреднением температуры на каждой вертикали по 2—9 сериям. В результате получено 7 обобщенных кривых 1 (—) для неустойчивой, 2 (—) — для нейтральной и 3 (—) — для устойчивой стратификации. В таблице приведены

разности между температурой воздуха на урезе воды T_{0z} и температурой воды на расстоянии 75—150 м при неустойчивой стратификации.

Из рис. 2, а и таблицы видно, что при неустойчивой стратификации интенсивность изменения температуры при натекании воздушного потока на водоем в очень сильной степени зависит от разности между температурой поверхности воды и температурой воздуха над сушей. Если температура воды меньше температуры воздуха над сушей, то наиболее интенсивное изменение температуры происходит на начальном участке пути, и тем значительнее, чем больше разность $T_n - T_{0z}$. Затем изменения температуры происходят медленнее. Если же температура воды больше температуры воздуха над сушей, то на начальном участке пути от 5 до 75 м в большинстве случаев изменение температуры происходит медленнее, чем на отдаленном участке. На участке от 75 до 150 м температура воздуха на высоте 2 м от поверхности воды всегда уменьшается.

Какой-либо закономерной связи между скоростью изменения температуры на участках 5—75 и 75—150 м и величиной скорости ветра в проведенных исследованиях заметить не удалось.

При устойчивой стратификации изменение температуры в зависимости от расстояния от берега существенно меняется. Если при неустойчивой стратификации наиболее интенсивное изменение температуры при $(T_n - T_{0z}) < 0$ наблюдается на участке 5—75 м, то при устойчивой стратификации на начальном участке пути изменение температуры происходит медленнее, чем на последующем участке от 75 до 150 м. Это различие в ходе температурных кривых при неустойчивой и устойчивой стратификациях при небольших расстояниях от берега, очевидно, можно объяснить сильным влиянием условий стратификации, которая в значительной мере определяет степень теплообмена в приповерхностных слоях воздуха с вышележащими слоями: при неустойчивой стратификации теплообмен более интенсивен и температура воздуха выравнивается быстрее, чем при устойчивой стратификации. Следовательно, в условиях наших наблюдений при малых расстояниях от берега при неустойчивой стратификации происходит более быстрое перераспределение температуры.

Поведение температурных кривых при нейтральной стратификации отражает переходную область, связывающую неустойчивые и устойчивые условия.

Для всех трех стратификаций по экспериментальным данным рис. 2, а были построены функции F , представленные на рис. 2, б. Точность полученных результатов в основном зависит от разностей $T_{xz} - T_{0z}$ и $T_n - T_{0z}$. Если эти разности малы, ошибки вычислений могут быть значительными. При нашей точности измерения температуры ($0,05^\circ$) средние ошибки вычисления функции F имели для точек на расстоянии 150 м от берега порядка 10%, на расстоянии 75 м от берега от 10 до 70% для всех условий температурной стратификации.

При неустойчивой стратификации поведение функции F вблизи берега имеет самый неопределенный характер. Она может значительно увеличиваться, если температура воды меньше температуры воздуха на берегу (кривые 1, 2, 3). Наоборот, уменьшаться, принимая большие отрицательные значения (кривые 4, 5) при небольшой разности температур между водой и воздухом на урезе воды. И иметь незначительную величину, если температура воды значительно больше температуры воздуха на берегу. По [4, 9] функция F с удалением от берега может только увеличиваться, достигая величины 0,3—0,5 при больших расстояниях от берега порядка 5—10 км при $z=2$ и $k/u=0,01$ м. Для

некоторых серий наблюдений мы рассчитали величины F по формуле (2), используя при этом полученные нами данные по скорости ветра.

Коэффициент турбулентности вычислялся по формуле $k = \kappa u_* z$ где $\kappa = 0,4$ — постоянная Кармана, u_* — динамическая скорость, $z = 2$ м. Величины отношения k/u , вычисленные по нашим данным, составляли $0,03—0,05$ м. Средние значения F для всех трех стратификаций оказались одинаковыми: для $x = 75$ м, $F = 0,04$ и для $x = 150$ м $F = 0,07$. При малых расстояниях от берега величины F , рассчитанные по формуле (2), много меньше значений F , рассчитанных по материалам наших наблюдений при неустойчивой стратификации.

Более близко к теоретическим выводам Тимофеева поведение функции F при нейтральной стратификации. С удалением от берега здесь наблюдается увеличение функции F с постепенным замедлением скорости роста (кривые 8, 9 рис. 2, б). Но сами значения F на порядок больше рассчитанных по формуле (2) и приблизительно в два раза больше полученных в [6] при $k/u = 0,01$ м.

Наиболее сопоставимы с результатами других авторов наши данные о величине F при устойчивой стратификации. Для расстояния от берега 75 м $F = 0—0,25$, для расстояния от берега 150 м $F = 0,55—0,6$. В [6] $F = 0,4$ для расстояния от берега порядка 50 м. По-видимому, у нас так же, как и в [6], при дальнейшем увеличении расстояния от берега функция F резко бы уменьшилась, приближаясь к теоретическим величинам, рассчитанным по формуле (2).

Полученные нами и в [6 и 7] результаты, очевидно, объясняются сохранением интенсивного турбулентного обмена, характерного для суши при резком изменении температуры подстилающей поверхности при переходе с суши на воду, а также появлением нисходящих вертикальных токов вблизи берега. Последний эффект, хорошо подтверждающийся экспериментальными данными [8], не учитывался Тимофеевым при его теоретических расчетах. Авторы же большинства натуральных исследований [3, 4] проводили измерения на больших расстояниях от берега, порядка 1 км и больше (стационарные посты ГМС). На таких расстояниях профиль метеорологических элементов уже значительно перестроился и береговые эффекты мало влияют на ход функции F .

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимофеев М. П. Метеорологический режим водоемов. Л., 1963.
2. Слуцкий Е. Е. Таблицы для вычисления неполной Γ функции и функции вероятности. М. — Л., 1950.
3. Браславский А. П., Викулина З. А. Нормы испарения с поверхности водохранилищ. Л., 1954.
4. Метеорологический режим озера Севан. Под ред. М. П. Тимофеева. М., 1960.
5. Шпак И. С. Изменение метеорологических элементов при натекании воздушного потока на водоем. «Труды Цыплянской ГМО», вып. 1, 1958.
6. Зайцев А. С., Серова Н. В. Некоторые результаты метеорологических наблюдений на Валдайском озере с помощью специально оборудованной лодки. «Труды ГГО», вып. 150, 1964.
7. Новожилова М. П. Расчет температуры и влажности воздуха над акваторией Новосибирского водохранилища. «Труды ГГО», вып. 207, 1967.
8. Константинов А. Р., Голубев В. С., Покудов В. В. Исследование характеристик воздушного потока, определяющих изменение испарения с поверхности водоема. «Труды ГТИ», вып. 81, 1960.
9. Тимофеев М. Н. Об изменении температуры и влажности воздуха над ограниченными водоемами. «Труды ГГО», вып. 59, 1956.

Поступила в редакцию
24.2 1972 г.

Кафедра
физики моря и вод суши