$$C_1 = \frac{bh^2}{2\sigma^2 z_y}\left\{\left(\varphi - \frac{\sigma}{h} z_y\right)^2 \operatorname{arctg}\left(\varphi - \frac{\sigma}{h} z_y\right) + \left(\varphi - \frac{\sigma}{h} z_y\right) - \right.$$
$$\left. - \operatorname{arctg}\left(\varphi - \frac{\sigma}{h} z_y\right) + \left(\varphi - \frac{\sigma}{h} z_y\right) \ln\left[1 + \left(\varphi - \frac{\sigma}{h} z_y\right)^2\right]\right\} -$$
$$- \frac{C_2}{z_y} + \frac{a}{2} z_y.$$

На рис. 2 сопоставлено вертикальное распределение скорости течения, рассчитанное по соотношению (8) для профиля $\Delta\rho$, который показан на рис. 1, с данными [1] (обозначены точками). Величины h и $\Delta\rho_{max}$ определены по данным [1] и равны 22 м и $3{,}7 \cdot 10^{-4}$ г/см^3 соответственно, а величина μ рассчитана по данным [2] и равна 70 г/(с·см). Видно, что полученное соотношение (8) дает величины скорости течения, достаточно хорошо согласующиеся с результатами прямых экспериментальных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Пыркин Ю. Г., Петров В. П., Самолюбов Б. И. Гидротехн. строительство, 1977, № 4, с. 9. [2] Кузнецов А. А., Пыркин Ю. Г., Соколов Л. В. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1978, 19, № 3, с. 19. [3] Пыркин Ю. Г., Пивоваров А. А., Хунджуа Г. Г. ДАН СССР, 1968, 179, № 3, с. 585. [4] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.

Поступила в редакцию
17.03.83

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1984, т. 25, № 1

УДК 551.46.09

ОБ ОЦЕНКЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОТОКА ТЕПЛА ВОДА—ВОЗДУХ В ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

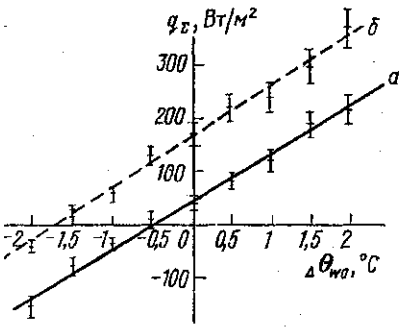
В. Н. Аксенов, Е. Г. Андреев, И. Д. Баканов

(кафедра физики атмосферы)

В основу экспериментов, цель которых — выбор условий проведения лабораторных исследований, наиболее приближенных к натурным, положена методика оценки потоков тепла по регистрациям профилей температуры в тонких миллиметровых приповерхностных слоях воды и воздуха.

Регистрации профилей температуры в воде проведены с помощью малоинерционного быстродействующего зондирующего устройства, подробное описание которого приведено в работе [1]. Для оценки потоков контактного тепла в воздухе использовалось зондирующее устройство, принципиально мало отличающееся от описанного в [1], но скорость зондирования уменьшена с помощью микрометрического винта до 0,13 мм/с, а для записи температуры (с точностью до 0,03°) использован двухкоординатный самописец типа ЛКД-4. Эксперимент проводился в термоизолированном бассейне с размерами 250×500×250 мм. Всего было получено более 200 непрерывных профилей температуры в воде и в воздухе при различных температурных режимах: 1) $\theta_a < \theta_w$; 2) $\theta_a \approx \theta_w$; 3) $\theta_a > \theta_w$, где θ_a — температура воздуха на высоте 10 см от поверхности воды, θ_w — температура воды на глубине 5 см; измерения проводились как при спокойной поверхности, так и при обдуве ее воздухом со скоростью до 2 м/с.

По зарегистрированным профилям температуры вблизи поверхности были проведены оценки суммарной плотности потока тепла в воде [1] $q_\Sigma = -\lambda \operatorname{grad} \Theta_z|_{z\to 0}$, где λ — коэффициент молекулярной теплопроводности воды, z — глубина; аналогично оценивался поток контактного тепла в воздухе, но с коэффициентом теплопроводности для воздуха. Во всех измерениях разность температур воды и воздуха $\Delta\theta_{wa}$ не превышала $\pm 2{,}5°$. Как видно из рисунка, на котором представлены результаты измерений, когда температура воды больше температуры воздуха, суммарная плотность потоков тепла направлена от воды в воздух и ее величина в среднем меняется от 50 до 200 Вт/м². Суммарная плотность потоков тепла направлена от воды в воздух и при условиях, когда температура воды равна температуре воздуха и даже меньше ее на 0,1—1,0°. Этим случаям на профилях температуры соответствует инверсия температуры, т. е. наличие так называемой холодной пленки. При температуре воздуха, большей некоторой температуры воды, суммарная плотность потока тепла направлена в воду, а профили температуры свидетельствуют о существовании теплой пленки воды.



Осредненные зависимости плотности суммарного потока тепла от разности температур вода—воздух: *а* — без обдува; *б* — с обдувом

Рассмотрим уравнение теплового баланса поверхностного слоя воды, который для нашего случая запишется в виде $q_\Sigma = q_и + q_к + q_{изл}$, где $q_и$ — плотность потока тепла на испарение, $q_к$ — плотность потока тепла вследствие контактного теплообмена, $q_{изл}$ — поток тепла на излучение, который в лабораторном эксперименте представляет собой разность потоков радиационного излучения поверхности воды и потолка лаборатории, или $q_{изл} = q(\Theta_w) - q(\Theta_a)$.

Оценим вклад $q_{изл}$ в суммарную плотность потока тепла. Изменение температуры на ΔT ведет к следующему изменению потока тепла:

$$\frac{dq_{изл}}{q_{изл}} = \frac{4\sigma T^3 \Delta T}{\sigma T^4} = \frac{4\Delta T}{T},$$

где σ — постоянная Стефана—Больцмана, T — абсолютная температура в кельвинах. Если принять $T = 300$ К, то $dq_{изл}/q_{изл} = 0{,}013\ \Delta T$. При изменении ΔT на 1° $q_{изл}$ меняется на величину, не превышающую 1,5%, и поэтому в уравнении теплового баланса величиной $q_{изл}$ можно пренебречь, т. е. $q_\Sigma = q_и + q_к$. Как видно из этого уравнения, в лабораторных условиях основной вклад в q_Σ вносят потоки тепла на испарение и контактный теплообмен. Положительной величине q_Σ соответствует поток, направленный от воды в воздух, а на поверхности воды наблюдается холодная пленка. При обдуве водной поверхности увеличивается интенсивность испарения и соответственно увеличивается суммарный поток тепла (см. рисунок). Однако при определенных значениях разности температур вода—воздух, увеличивающейся при обдуве, суммарный поток тепла может быть также направлен от поверхности воды в глубину, а профили температур свидетельствуют о теплом поверхностном слое воды.

Для рассмотренных условий были отобраны регистрации профилей температуры в приводном слое воздуха и получены оценки плотности потока контактного тепла $q_к$. Величины этих потоков достигали значений до 200 Вт/м^2. Это значит, что при условии, когда температура воздуха больше температуры воды, суммарный поток тепла может быть направлен от воздуха в воду, если поток тепла на испарение много меньше интенсивности контактной теплопередачи. Этот случай, когда на поверхности воды существует теплый слой воды, может реализоваться в специфических условиях лаборатории, тогда как в условиях открытого моря такого рода профили наблюдаются редко. В отличие от лабораторных условий в открытом море больший вклад в суммарный поток тепла дает испарение и эффективное излучение поверхности моря [2]. Интенсивное испарение, эффективное излучение и малый контактный теплообмен — все это формирует в условиях открытого моря холодную пленку, и суммарный поток, как правило, оказывается направленным от воды в воздух.

Таким образом, наиболее приближенными к условиям открытого моря и малооблачной погоды в лабораторных исследованиях относятся случаи, когда температура воздуха ниже температуры воды, а суммарный поток тепла направлен в воздух.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Андреев Е. Г., Гуров В. К., Хунджуа Г. Г. В кн.: Теплообмен V. Т. 10. Киев, 1976, с. 94—97. [2] Андреев Е. Г., Пыркин А. Ю. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон., 1982, 23, № 3, с. 72.

Поступила в редакцию
06.04.83

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1984, т. 25, № 1

УДК 533.6.011.72

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СТРУКТУРЫ СИЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН В АРГОНЕ

Суфиан Аслам (Пакистан), А. П. Рязин

(кафедра молекулярной физики)

При экспериментальных исследованиях структуры сильных ударных волн (УВ) и процессов течения ударно нагретого газа неоднократно отмечались различные особенности: нарушение плоской формы фронта УВ в ударной трубе, возникновение вспышек свечения за фронтом, немонотонное распределение плотности и концентраций электронов в релаксационной зоне, возникновение «предвестников» перед УВ и др. [1—7].

В последние годы были опубликованы результаты систематических экспериментальных исследований нестабильностей в УВ и неустойчивости течения за ними в аргоне, криптоне, ксеноне, углекислом газе, фреоне (см. [1] и цитированные там работы). Было обнаружено следующее: возникновение нестабильностей в УВ носит пороговый по скорости и начальному давлению характер; УВ с нестабильной структурой фронта соответствуют как немонотонным, так и монотонным участкам равновесной адиабаты Гюгонио (Ar, Kr, Xe, CO_2).

Эксперименты, проведенные в аргоне и ксеноне, показали, что: а) в аргоне при начальном давлении $p_1=5$ Тор и числе Маха УВ $M\sim17$