

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ

## ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ

### НА ДВИЖЕНИЕ

### СПОРТИВНЫХ ЛОДОК

**Дана оценка влияния на скорость спортивных лодок изменения температуры воды в диапазоне, характерном для естественных водоемов при наличии тепловых выбросов от ТЭЦ. Получена формула для величины изменения скорости лодки в зависимости от изменения температуры водной среды.**

#### Введение

На сегодняшний день остается широко распространенной система прямооточного водоснабжения теплоэлектростанций, при котором вода, забираемая из искусственного или естественного водоема, используется для конденсации отработавшего в турбинах пара и возвращается в водоем, подогретая на 8-12 градусов. Смещение со средой водоема создает неоднородные тепловые и гидродинамические поля. Наряду с возможным воздействием на экологическое состояние водоема «тепловое загрязнение» влияет на свойства воды, зависящие от температуры, прежде всего, на вязкость. В то же время, естественные водоемы являются зонами проведения соревнований в водных видах спорта. Например, в рамках предстоящей в г. Казань в 2013 г. Универсиады планируется проведение соревнований по гребному спорту в акватории оз. Средний Кабан, используемого ТЭЦ-1 в качестве элемента системы прямооточного водоснабжения. Температура отработанной воды, поступающей в основную акваторию озера, оказывается выше фоновой температуры в водоеме, что приводит к формированию поверхностных теплых водных потоков размерами до нескольких сотен метров, которые могут затрагивать зоны гребных трасс. В связи с этим возникает вопрос о возможном влиянии изменения температуры воды в области проведения соревнований на скоростные качества спортивных лодок.

**Д.В. Маклаков\***,  
доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры гидроаэромеханики,  
ФГАОУ ВПО Казанский (Приволжский) федеральный университет

**Ш.Х. Зарипов**,  
доктор физико-математических наук,  
заведующий кафедрой моделирования экосистем, ФГАОУ ВПО Казанский (Приволжский) федеральный университет

**С.И. Краснов**,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры теоретических основ теплотехники,  
Казанский государственный энергетический университет

#### Результаты и их обсуждение

Сила сопротивления движущейся в воде лодки складывается из нескольких компонент: сопротивления трения, сопротивления формы, сопротивления волнообразования и аэродинамического сопротивления части лодки, выступающей над водной поверхностью. Современные спортивные гребные лодки движутся в водоизмещающем режиме, причем их обводы характеризуются большим удлинением ( $L/B = 12-35$ , где  $L$  и  $B$  – длина и ширина по ватерлинии), что обеспечивает относительную малость (не более 35 % в общем сопротивлении) составляющих общего сопротивления, не зависящих от вязкости воды. Остановимся далее на анализе сопротивления трения, пренебрегая другими составляющими общего сопротивления.

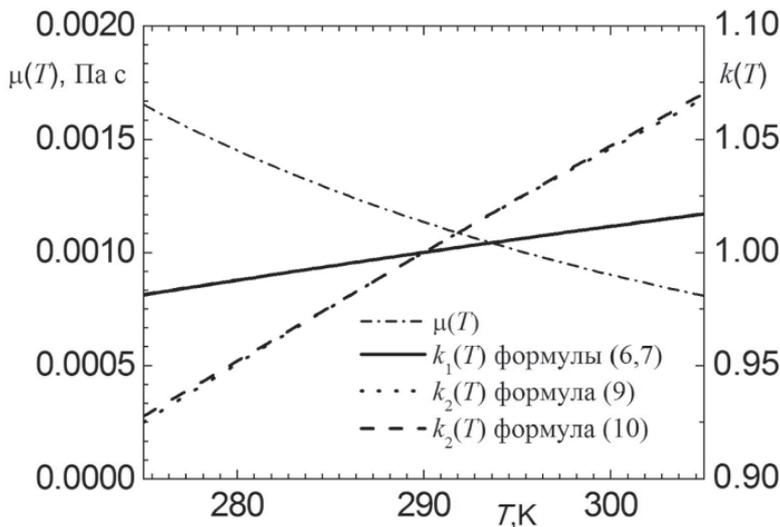
Известно, что динамический коэффициент вязкости существенно зависит от температуры воды  $T$ . На основе аппроксимации экспериментальных данных предложены различные приближенные формулы  $\mu(T)$ . Воспользуемся приближенной формулой, приведенной в [1]

$$\mu = 1,147 \times 10^{-6} \exp(2000/T), \text{ Па} \cdot \text{с} \quad (1)$$

Зависимость  $\mu(T)$  для диапазона изменения температуры от 275 К до 305 К показана на рис. 1. Видно, что в рассмотренном диапазоне динамический коэффициент вязкости может уменьшиться более чем в два раза.

Оценим, насколько изменится скорость лодки при изменении температуры, характерном для водоемов с источниками тепловых выбросов, для зависимости коэффициента вязкости, задаваемого формулой (1).

\* Адрес для корреспонденции: dmitri.maklakov@ksu.ru



**Рис. 1.** Зависимости коэффициента вязкости и параметра от температуры при  $T_0=290$  К.

Пусть  $T_0$  – фоновая температура в водоеме и  $U_0$  – скорость движения лодки при температуре  $T_0$  в воде с вязкостью  $\mu_0$ . Для движения со скоростью  $U_0$  гребец должен затрачивать мощность  $W_0$ , равную

$$W_0 = R_0 \cdot U_0 \text{ Вт,}$$

где  $R_0$  – сопротивление трения лодки при температуре  $T_0$  и скорости  $U_0$ . В зоне с измененной температурой  $T$  при сохранении мощности  $W_0$  из-за изменения  $\mu$  изменится сопротивление трения и скорость движения лодки. Обозначим через  $R$  и  $U$  новые сопротивление трения лодки и скорость движения. Найдем зависимость отношения  $k = U / U_0$  от температуры воды  $T$ .

Движение лодки возможно в двух режимах развития пограничного слоя – ламинарном и турбулентном. Какой из этих режимов будет реализовываться, определяется, главным образом, числом Рейнольдса

$$Re = \rho UL / \mu, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $L$  – характерный размер, за который в данном случае следует принять длину лодки. Плотность воды слабо зависит от температуры в рассматриваемом диапазоне, поэтому далее считаем, что  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ . По формуле (1) находим, что  $\mu = 1.13 \times 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$  при  $T=290\text{К}$ , тогда

$$Re \approx 106 \cdot U \cdot L,$$

где  $U$  измеряется в м/с,  $L$  в метрах. Ламинарный режим реализуется для чисел Рейнольдса порядка не более. Длины  $L$  типичных спортивных лодок меняются от 5 до 20 м и средняя скорость на дистанции ~4–6 м/с.

Т.о., число Рейнольдса находится в пределах  $20 \times 10^6 - 120 \times 10^6$  и режим обтекания может считаться полностью турбулентным. Так как волновое сопротивление и сопротивление формы малы, лодку можно считать плоской, заменив ее пластиной длины  $L$  и ширины  $H$ . Скорость вдоль всей поверхности лодки примем постоянной. Сопротивление плоской пластины при полностью турбулентном пограничном слое определяется формулой [2]

$$R = 0.0307 Re^{-1/7} \frac{\rho U^2}{2} LH = 0.0307 \left( \frac{\mu}{\rho UL} \right)^{1/7} \frac{\rho U^2}{2} LH \quad (3)$$

Приравнявая мощность, затрачиваемую гребцом на преодоление сил трения при температуре  $T_0$ , мощности при новой температуре, приходим к уравнению

$$0.0307 \left( \frac{\mu_0}{\rho U_0 L} \right)^{1/7} \frac{\rho U_0^3}{2} LH = 0.0307 \left( \frac{\mu}{\rho UL} \right)^{1/7} \frac{\rho U^3}{2} LH \quad (4)$$

где  $\mu_0 = \mu(T_0)$ .

После очевидных сокращений получаем формулу

$$\frac{U}{U_0} = \left( \frac{\mu_0}{\mu} \right)^{1/20} \quad (5)$$

и, с учетом (1),

$$k_1(T) = \frac{U}{U_0} = \exp \left[ \frac{100(T - T_0)}{T \cdot T_0} \right] \quad (6)$$

В рассматриваемом диапазоне изменения  $T$  и  $T_0$  аргумент у экспоненты в формуле (6) имеет порядок нескольких сотых, поэтому справедлива приближенная формула

$$k_1(T) = 1 + 100 \cdot (1/T_0 - 1/T) \quad (7)$$

Зависимости (6) и (7) при  $T_0=290$  К (рис. 1) практически неразличимы. Из рис. 1 видно, что при изменении температуры на несколько градусов отклонения скоростей весьма малы. Например, при  $T_0=290$  К,  $T=295$  К по формуле (7) получаем  $k_1=1,0058$ , при той же температуре  $T_0=290$  К, но  $T=300$  К значение  $k_1=1,0115$ . Таким образом, если температура отклоняется от фоновой не более, чем на 5 градусов, то соответствующие изменения скорости будут не более 0,6 %. В случае, когда наибольшее отклонение температуры

в водоеме от фоновой не превышает 10 градусов, максимальное ожидаемое изменение скорости будет равно 1,15 %. Приведенная оценка касается лишь сопротивления трения, являющегося частью общего сопротивления лодки, т.е. влияние изменения вязкости будет еще меньше. Кроме того, следует учитывать, что хотя область повышенной температуры будет затрагивать гребную трассу, но в целом температура заметно снижается по мере удаления от места выброса, и на большей части трассы температура будет близка к фоновой.

В тех же водоемах наряду с соревнованиями по гребным видам спорта проводятся и соревнования радиоуправляемых парусных яхт, размеры которых на порядок меньше. Характерным длинам  $L=0,7-1,7$  м и скоростям  $U=0,1-1,5$  м/с (при слабом ветре) соответствует диапазон чисел Рейнольдса  $5 \times 10^3 - 10^6$ , т.е. движение малых лодок может осуществляться в ламинарном режиме. В этом случае сопротивление эквивалентной пластины выразится по формуле [2]

$$R = 1.328 \text{Re}^{-1/2} \frac{\rho U^2}{2} LH \quad (8)$$

Используя выражение (8), получим формулы, аналогичные (6), (7)

$$k_2(T) = \frac{U}{U_0} = \exp \left[ \frac{400(T - T_0)}{T \cdot T_0} \right] \quad (9)$$

$$k_2(T) = 1 + 400 \cdot (1/T_0 - 1/T) \quad (10)$$

Зависимости (9), (10) при  $T_0 = 290$  К приведены на рис. 1. При  $T_0 = 290$  К,  $T=295$  К и

**Ключевые слова:**  
спортивные лодки,  
ТЭЦ,  
тепловые выбросы,  
коэффициент вязкости

$T=300$  К по формуле (9) получаем  $k_2=1,0237$  и  $k_2=1,0471$ . Таким образом, для отклонений температуры от фоновой на 5 и 10 градусов изменения скорости будут в пределах 2,37 % и 4,71 %, соответственно. Это означает, что для ламинарного режима обтекания влияние изменения температуры на движение лодок может оказаться весьма существенным.

## Заключение

Полученные результаты позволяют сделать общий вывод о незначительном влиянии типичных тепловых выбросов в открытые водоемы на условия проведения соревнований по спортивной гребле. В то же время это влияние будет более заметным, если будут проводиться соревнования для малых радиоуправляемых лодок.

*Работа выполнена при поддержке лаборатории водных экосистем Казанского федерального университета и РФФИ (проекты №12-01-00333 - а и 12-01-00996 - а).*

## Литература

1. Шашин В.М. Гидромеханика. М.: Изд. Высшая школа, 1990. 384 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Физматлит, 1978. 736 с.



D.V. Maklakov, Sh.H. Zaripov, S.I. Krasnov

## WATER TEMPERATURE INFLUENCE ON THE SPEED OF SPORT BOATS

The influence of water temperature changes on the speed of sport boats has been investigated. In the temperature range, typical of open lakes with thermal discharges from heat electropower stations, a simple formula which expresses the change of the speed versus that of the water temperature has been obtained.

**Key words:** sport boats, heat electropower stations, thermal discharges, viscosity coefficient