

УДК 004.942:001.57+519.7+612.5

И.И. ЕРМАКОВА, Ю.Н. СОЛОПЧУК

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАНУ и МОНУ, Киев, Украина

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ЧЕЛОВЕКА В ВОДЕ

В статье рассмотрены методы определения коэффициента конвективного теплообмена человека в воде. Проанализированы факторы, приводящие к разбросу значений коэффициента при различных подходах к его определению. Представлены теоретические и эмпирические зависимости для расчета коэффициента теплообмена конвекцией при различных условиях пребывания человека в воде.

Ключевые слова: моделирование, конвективный теплообмена воде, терморегуляция человека.

I.I. YERMAKOVA, Y.M. SOLOPCHUK

International Research and Training Centre for Information Technologies and Systems of the National Academy of Sciences (NAS) of Ukraine and Ministry of Education and Science (MES) of Ukraine, Kyiv, Ukraine

CONVECTIVE HEAT EXCHANGE OF MAN IN WATER

Abstract – The aim of this paper is the analysis of existing methods for the determination of convective heat transfer coefficient during human immersion in cold water to clear up features of this value. The factors leading to the data scattering of the convective heat transfer coefficients were investigated. The theoretical and empirical equations for convective heat transfer coefficients during different human water immersions were presented. It was showed that human cooling in cold water depends on human physical and physiological characteristics as the water environmental parameters: human body constitution, namely fat layer, water salinity, water velocity, water and skin temperatures and others. The analysis of studies showed that crucial factor that affects convective heat transfer coefficient is a physiological status of man in cold water, in particular the thermoregulatory responses: shivering and physical activity level.

Keywords: modelling, convective heat exchange, human thermoregulation, water immersion.

Введение

Разработка и применение математических моделей терморегуляции человека при погружении в холодную воду относится к передовым направлениям в разработке информационных технологий. Ключевым моментом в построении таких математических моделей является определение коэффициента конвективного теплообмена с водой. В отличие от воздуха, где теплообмен происходит радиационным и конвективным путем, испарением влаги с поверхности кожи и верхних дыхательных путей, теплообмен в воде происходит только за счет конвекции. Теплофизические свойства воды определяют процесс конвективного теплообмена, который значительно отличается от воздуха. Изменение температуры воды на один градус или скорости движения воды на 0,1 м/с существенно влияет на охлаждение человека в воде. Определение величины коэффициента конвективного теплообмена является важной и самостоятельной задачей. Целью данной работы является анализ существующих методов определения коэффициента конвективного теплообмена человека в воде и факторов, влияющих на его величину.

Определение величины коэффициента конвективного теплообмена

Существуют несколько подходов в определении коэффициента конвективного теплообмена человека в воде. Условно их можно разделить на две группы. В первом случае тело человека представляется одним цилиндром или набором цилиндров, а коэффициент конвективного теплообмена рассчитывается по законам термодинамики. Во втором, расчет коэффициента конвективного теплообмена осуществляется по данным, полученным при измерении тепловых потерь в воде при участии волонтеров или на манекене.

В таблице 1 представлены коэффициенты конвективного теплообмена человека в воде, полученные различными исследователями. Как видно из таблицы 1 наблюдается значительный разброс значений от 46 Вт/м²°С до 537 Вт/м²°С в стоячей воде температурой 20 °С для неподвижного человека. Существует множество объяснений этому факту. Например, формула, используемая для гладкого цилиндра, не может быть использована без коррекции для человека из-за геометрии тела. Использование даже самого совершенного манекена не может учесть физиологические реакции, такие как сужение периферических кровеносных сосудов и терморегуляторной сократительной реакции скелетных мышц тела человека (дрожь). Нельзя исключить ошибки при измерении температуры кожи или тепловых потоков на волонтерах. Технологии экспериментов также могут влиять на величину коэффициента конвективного теплообмена.

Стандартная формула для определения коэффициент теплообмена конвекцией в воде имеет вид:

$$h^{CW} = \frac{K_W \cdot Nu}{L} \quad (1)$$

где K_W – теплопроводность воды, ккал/ч·м°С;

Nu – число Нуссельта;

L – характерный размер, высота или диаметр цилиндра, аппроксимирующего тело человека, м.

Число Нуссельта, — один из основных критериев подобия тепловых процессов, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена путем конвекции и интенсивностью теплообмена путем теплопроводности в условиях неподвижной среды. Число Нуссельта всегда больше или равно 1, то есть тепловой поток конвекцией всегда превышает тепловой поток путем теплопроводности. Обычно для ламинарных течений число Нуссельта находится в диапазоне от 1 до 20. Большие числа Нуссельта ($Nu > 100$)

свидетельствуют о сильном конвективном тепловом потоке, что является характеристикой турбулентных течений.

Таблица 1

Коэффициент конвективного теплообмена человека с водой

Авторы	$T_{\text{в}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$V_{\text{в}}, \text{ м/с}$	Активность	$H_{\text{с}}, \text{ Вт/м}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
Boutelier С. и соавт. [1]	33-34	0	неподвижный	42
	18	0	неподвижный	53,5
	33-34	0,05	неподвижный	63
	33-34	0,1	неподвижный	81
	33-34	0,25	неподвижный	147
Colin J. и соавт. [2]		0	неподвижный	44
		0	дрожь	61
Gee G.K. и соавт. [3]	35	0	неподвижный	38
	32	0	неподвижный	96
	28	0	неподвижный	208
	24	0	неподвижный	358
	20	0	неподвижный	537
Goldman R.F. и соавт. [4]	20	0	неподвижный	49
Lefevre J. [5]	20	0	неподвижный	62,8
McMurray R.G. и соавт. [6]	20-35	0	плавание	428±48
Nadel E.R. и соавт. [7]	18-33	0	неподвижный	230
	18-33	0,5-0,75	неподвижный	460
	18-33	0,5-0,75	плавание	580
Parsons K. [8]	20	1	неподвижный	453
	20	0	неподвижный	132
Rapp G.M. [9]	22	0	неподвижный	94
	22	0,1	неподвижный	179
	22	0,3	неподвижный	310
	22	0,5	неподвижный	400
Strong L.H. и соавт. [10]	-	0	неподвижный	235
Tikuisis P. и соавт. [11]	20	0	неподвижный	166
	28	0	неподвижный	205,8
Witherspoon J.M. и соавт. [12]	20	0,005	(манекен)	137
	20	0,15	(манекен)	206
	20	0,5	(манекен)	588
	20	0,8	(манекен)	1434
Xu X. и соавт. [13, 14]	-	Спокойное море		160
	-	Волны		460

В зависимости от состояния воды и поведения человека конвекция в воде может быть свободной либо вынужденной, при этом число Нуссельта рассчитывается по-разному. В водной среде одновременно присутствуют оба вида конвекции. Соотношение Gr/Re^2 , где Gr – число Грасгофа, а Re – число Рейнольдса определяет вид конвекции. Если соотношение $Gr/Re^2 < 1$, то преобладает вынужденная конвекция, в противном случае преобладает свободная конвекция. В случае если соотношение близко к единице, то оба вида конвекции присутствуют.

Характер потока жидкости определяется соотношением силы инерции и силы внутреннего трения – число Рейнольдса (Re), которое пропорционально соотношению инерционных сил к силе внутреннего трения:

$$Re = \frac{V_W \cdot L}{\mu} \tag{2}$$

где V_W – скорость воды, м/с;

L – характерный размер – рост человека, м;

μ – кинематическая вязкость, м²/с.

Если число Рейнольдса одинаково для двух людей или объектов подобной формы, но разных размеров, то характер потока для них будет такой же. Для каждого вида течения существует критическое число Рейнольдса, которое, как принято считать, определяет переход от ламинарного течения к

турбулентному. При $Re < Re_{кр}$ течение происходит в ламинарном режиме, при $Re > Re_{кр}$ возможно возникновение турбулентности. Критическое значение числа Рейнольдса зависит от конкретного вида течения, различных возмущений потока, такими как изменение направленности и модуля вектора скорости потока, шероховатости стенок и др. Boutelier и соавт. [1] экспериментально определили, что в термонейтральных условиях, несмотря на высокое значение числа Рейнольдса, поток ламинарный. В холодной воде, когда человек дрожит, характер потока находится на грани ламинарного и турбулентного.

Число Прандтля — один из критериев подобия тепловых процессов в жидкостях и газах учитывает влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу. Число Прандтля — физическая характеристика среды и зависит только от её термодинамического состояния. Число Прандтля изменяется с изменением температуры тем значительнее, чем больше вязкость жидкости, например, для воды при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $Pr = 13,5$, а при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $Pr = 1,74$.

Число Прандтля определяется соотношением кинематической вязкости к коэффициенту температуропроводности:

$$Pr = \frac{\mu}{D}, \quad (3)$$

где μ — кинематическая вязкость воды, $\text{м}^2/\text{с}$;

D — коэффициент температуропроводности воды, $\text{м}^2/\text{с}$.

В стоячей воды тепловые потери происходят за счет свободной конвекции, которая определяется разницей температур между поверхностью тела человека и водой, коэффициента теплового расширения и силы гравитации, что описывается числом Грасгофа:

$$Gr = \frac{\beta g L^3 (T_{skin} - T_W)}{\mu^2} \quad (4)$$

где β — коэффициент объёмного расширения воды, $1/^{\circ}\text{C}$;

g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

L — характерный размер, в данном случае рост человека, м ;

T_{skin} — температура кожи, соприкасающейся с водой, $^{\circ}\text{C}$;

T_W — температура воды, $^{\circ}\text{C}$;

μ — кинематическая вязкость воды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Числа Прандтля, Рейнольдса и Грасгофа зависят от температуры и физических свойств воды: солёности, теплоёмкости, теплопроводности, кинематической вязкости и температуропроводности.

В среднем солёность мирового океана составляет около 3,5 % с колебаниями от 3,4 до 3,6 %. Скорость движения воды в океане находится в пределах от 0,05 до 0,1 м/с без учета штормового состояния. Скорость океанических движений варьируется от 0,5 до 2,6 м/с (Гольфстрим). Морская вода, представляющая собой сложный раствор, её физические свойства, в том числе и плотность значительно отличаются от свойств химически чистой воды, что влияет на процесс конвективного теплообмена. Поэтому авторы предлагают различные формулы для числа Нуссельта при вынужденной и свободной конвекции.

Boutelier и соавт. основываясь на результатах своих исследований, предложили следующие формулы для расчёта числа Нуссельта. Для свободной конвекции число Нуссельта:

$Nu_{fr} = 0,09 \cdot (Pr \cdot Gr)^{0,275}$. При вынужденной в случае ламинарного потока: $Nu_{L_{fo}} = 0,664 \cdot Pr^{0,33} Re^{0,5}$, а

для случая турбулентного — $Nu_{L_{fo}} = 0,023 \cdot Pr^{0,4} Re^{0,8}$ [1].

Parsons использует для расчёта числа Нуссельта при свободной конвекции формулу Boutelier и соавт. При этом коэффициент конвективного теплообмена при вынужденной конвекции определяется только числом Рейнольдса и аналогичен расчёту коэффициента теплообмена в воздухе: $Nu_{fo} = 0,24 Re^{0,6}$ [8]. Tikuisis P. использует в своих расчётах для свободной конвекции следующую формулу:

$Nu_{fr} = 0,54 \cdot (Pr \cdot Gr)^{0,25}$, а для вынужденной формулу Boutelier и соавт.: $Nu_{L_{fo}} = 0,66 \cdot Pr^{0,33} Re^{0,5}$ [11].

Тепловой поток, переносимый конвективным путём от человека в водную среду имеет вид:

$$Q^{CW} = h^{CW} A (T_{skin} - T_e), \quad (5)$$

где h^{CW} — коэффициент теплообмена конвекцией, $\text{ккал}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2\cdot\text{C})$;

A — площадь поверхности кожи, м^2 ;

T_e — температура воды, $^{\circ}\text{C}$.

Факторы, влияющие на конвективный теплообмен

В задачу многих исследований входило не только определение коэффициента конвективного теплообмена в воде и нахождение эмпирических зависимостей для расчёта конвективных тепловых потерь в зависимости от температуры и скорости воды, но и определение факторов, влияющих на конвективный

теплообмен.

Boutelier С. и соавт. [1] в своем исследовании попытались найти объяснение сильному разбросу значений коэффициента теплообмена конвекцией в воде, проведя исследования при разных скоростях воды, различных интенсивностях мышечной дрожи, а также конституции тела человека в диапазоне температур от 18 до 33,7 °С. В экспериментах человек в нижнем белье лежал неподвижно в воде в течение нескольких часов, лицо оставалось на воздухе. Они получили математические выражения для расчёта коэффициента теплообмена в зависимости от скорости воды при температуре воды 33 °С. Было установлено, что более высокое значение коэффициента характерно для более худых людей, но это связано не с диаметром тела, а с интенсивностью дрожи, которая выше у худых. С ростом скорости воды разница между температурой кожи и воды уменьшается. При температуре воды ниже термонейтральной коэффициент конвективного теплообмена увеличивается с уменьшением температуры и увеличением скорости воды. Но в стоячей воде он практически не зависит от температуры. Незначительный рост в этом случае наблюдался только при температуре ниже 25 °С. Boutelier и соавт. пришли к выводу, что в стоячей воде увеличение коэффициента с понижением температуры воды объясняется влиянием непроизвольного сократительного движения скелетных мышц человека на пограничный слой. С ростом тепловых потерь интенсивность дрожи усиливается, влияя на пограничный слой с возможным переходом конвекции от свободной к вынужденной. Изменение имеет резкий характер, так как пограничный слой очень тонкий. Когда устанавливается новый вид конвекции или потока, то коэффициент теплообмена снова становится константой, приобретая значение обычно выше, чем в термонейтральных условиях [1]. Эти значения выше чем расчётные, представленные Rapp, который получил для стоячей воды $h_c = 94 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ и $179\text{--}400 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ для воды со скоростью от 0,1 до 0,5 м/с [9]. Экспериментальные данные других исследователей также говорят о сильном влиянии на коэффициент конвективного теплообмена не только формы тела человека, но также и терморегуляционных реакций, таких как сужение сосудов и дрожь [7, 10].

Nadel и соавт. исследовали зависимость коэффициента теплообмена конвекцией от скорости воды и физической активности человека. Они показали, что во время плавания коэффициент конвекции не зависит от скорости воды и температуры в диапазоне температур воды от 18 до 33 °С и равен $580 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$. Авторы объясняют отсутствие зависимости коэффициента теплообмена от скорости высокой турбулентностью воды возникающей во время плавания, которая не вызывает существенной разницы в эффективных скоростях воды вокруг человека. При высоких скоростях воды 0,5–0,75 коэффициент также не зависит от температуры и равен $460 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$. По результатам своих исследований, они также сообщают, что в стоячей воде при отсутствии движений человека коэффициент равен $230 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ и также не зависит от температуры воды [7].

McMurray и соавт. также исследовали влияние физической нагрузки в воде на коэффициент конвективного теплообмена и показали, что в диапазоне от 20 до 35 °С он не зависит от температуры воды и вида выполняемой нагрузки (бег в воде, плавание), при этом коэффициент равен $428\pm 48 \text{ Вт/м}^2\text{°С}$ [6]. Во время плавания температура ядра снижается быстрее чем при неподвижном пребывании человека в воде, так как потери тепла конвекцией, которые являются единственным видом теплообмена в воде, значительно увеличиваются в результате увеличения турбулентности во время плавания [6, 7].

Выводы

Анализ существующих методов определения конвективного теплообмена в воде привёл к следующему заключению (рис. 1).



Рис. 1. Конвективный теплообмен человека с водой

Процесс охлаждения человека в воде зависит от множества физических характеристик человека и водной среды: соленость, скорость движения воды, температура воды и кожи, конституция человека и многие другие. Однако анализ существующих исследований показал, что наиболее важным фактором в определении величины коэффициента конвективного теплообмена является физиологическое состояние человека в воде, а именно терморегуляторная реакция сократительного термогенеза (дрожи) и мощность физической нагрузки.

References

1. C. Boutelier, L. Bougues, and J. Timbal, "Experimental study of convective heat transfer coefficient for the human body in water", *J. Appl. Physiol.*, Vol. 42, 1977 pp. 93–100.
2. J. Colin, J. Timbal, J.D. Guieu, C. Boutelier, and Y. Houdas, "Combined effect of radiation and convection", *Physiological and behavioral temperature regulation*, edited by J. D. Hardy, A. P. Gagge, and J. A. J. Stolwijk, Springfield: Thomas, 1970, pp. 81-96.
3. G.K. Gee, R.F. Goldman, "Heat loss of man in total water immersion", *Physiologist*, Vol. 16, 1973 P. 318.
4. R.F. Goldman, J.R. Breckenridge, E. Reeves, and E.L. Beckman, "Wet versus dry suit approaches to water immersion protective clothing", *Aerospace Med.*, Vol. 37, 1966 pp. 485-487.
5. J. Lefevre, "Chaleur animale et bio-energetique", *Traits' de Physiologie*, Vol. 8, 1929 pp. 407-545.
6. R.G. McMurray and S.M. Horvath, "Thermoregulation in swimmers and runners", *J. Appl. Physiol.*, Vol. 46, 1979 pp. 1086-1092.
7. E.R. Nadel, I. Holm?r, U. Bergh, P.O. Astrand, and J. Stolwijk, "Energy exchanges of swimming man", *J. Appl. Physiol.*, Vol. 36(4), 1974 pp. 465–471.
8. K. Parsons, *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*, Boca Raton: CRC Press, 2014.
9. G.M. Rapp, "Convection coefficients of man in a forensic area of thermal physiology: heat transfer in underwater exercise", *J. Physiol. Paris*, Vol. 63, 1971 pp. 392-396.
10. L.H. Strong, G.K. Gee, and R.F. Goldman, "Metabolic and vasomotor insulative responses occurring on immersion in cold water", *J. Appl. Physiol.*, Vol. 58, 1985 pp. 964-977.
11. P. Tikuisis, R.R. Gonzalez, and K. Pandolf, "Thermoregulatory model for immersion of humans in cold water", *J. Appl. Physiol.*, Vol. 64(2), 1988 pp. 719–727.
12. J.M. Witherspoon, R.F. Goldman, J.R. Breckenridge, "Heat transfer coefficients of humans in cold water" *Physiol. Paris*, Vol. 63, 1970 pp. 459-462.
13. M.M. Toner and W.D. McArdle, "Human thermoregulatory responses to acute cold stress with special reference to water immersion", *Handbook of physiology: environmental physiology*, edited by J.R. Pappenheimer, M.J. Fregly, C.M. Blatties, Oxford: Oxford University Press, 1996, pp. 379 – 397.
14. X. Xu, P. Tikuisis, "Thermoregulatory modeling for cold stress", *Comprehensive Physiology*, Vol. 4, 2014vpp. 1057–1081.

Рецензія/Peer review : 13.3.2015 р.

Надрукована/Printed :15.4.2015 р.

Рецензент: стаття рецензована редакційною колегією