

УДК 519.7+519.9+519.95+681.5+615.846

А.И. Богатёнок

Моделирование влияния длинноволновой радиации на человека в помещении

Разработана информационная технология, которая позволяет прогнозировать влияние длинноволновой радиации на человека в помещении. Информационная технология учитывает физиологические характеристики человека, одежду и уровень физической активности, соответствующий его профессиональной деятельности, а также характеристики среды – температура воздуха, скорость движения воздуха и влажность воздуха. Математическая модель учитывает размеры помещения и местонахождение человека в комнате. Модель предоставляет возможность точного расчёта влияния факторов проекции между человеком и стенами, полом, потолком, окнами, дверью, радиаторами и др., на теплообмен человека со средой. Модельные эксперименты демонстрируют высокую чувствительность модели.

The information technology which allows to predict influence of long-wave radiation on the human indoors is developed. The information technology considers physiological characteristics of the human, clothes and the level of physical activity corresponding to his profession, and also environment characteristics – air temperature, ventilation and humidity. The mathematical model considers the sizes of a room and an occurrence of human there. The model gives possibility of exact calculation influence of angle factors between the human and walls, a floor, a ceiling, windows, a door, radiators, etc., on heat exchange of the human with environment. Modeling experiment shows its high sensitivity.

Введение

Многие авторы работают над проблематикой моделирования влияния длинноволновой радиации на человека в помещении [1 – 7]. Компьютерное моделирование дополняет методы экспериментальной физиологии и медицины, поскольку предоставляет возможность рассчитать достаточно большое количество физиологических параметров, оценить резервы жизнедеятельности организма, исследовать различные научные задачи.

Метод и цель

Целью работы является – разработка информационной технологии прогноза функцио-

нального состояния человека в помещении при влиянии длинноволновой радиации.

Математическое описание теплообмена излучением имеет вид [8]:

$$R = h_{ij}^R A_{ij} (T_{ij} - T_r), \quad (1)$$

где h_{ij}^R – коэффициент теплообмена излучением, A_{ij} – площадь участка ij – компартамента (участка тела человека), T_{ij} – температура ij – компартамента, T_r – средняя радиационная температура.

Определяющее значение для расчёта теплообмена излучением является расчёт средней радиационной температуры. Для этого необходимо рассчитывать факторы проекции, отражающие степень влияния поверхности на человека. Для определения факторов проекции в модели используются формулы (2, 3), предложенные международной организацией стандартов [9]:

$$f_p = f_{\max} \left(1 - e^{-(a/c)/\tau} \right) \cdot \left(1 - e^{-(b/c)/\gamma} \right), \quad (2)$$

$$\tau = A + B(a/c), \quad \gamma = C + D(b/c) + E(a/c), \quad (3)$$

где f_p – фактор проекции, учитывающий степень влияния поверхности на человека, f_{\max} , A , B , C , D , E – коэффициенты, a – длина стен, пола и потолка, b – ширина пола, потолка, или высота стен, c – расстояние от человека до стен, пола, потолка.

В зависимости от того, сидит или стоит человек, коэффициенты формул (2, 3), учитывающие влияние излучающих поверхностей на человека, изменяют свои значения. В таблице 1 представлена их зависимость, предложенная международной организацией стандартов [9]:

Значение средней радиационной температуры после определения факторов проекции рассчитывается по формуле [8]:

$$T_r = \sum_{i=1}^n T_i \cdot f_{pi}, \quad n = 24 \quad (4)$$

где T_r – средняя радиационная температура; T_i – температуры поверхностей (стен, пола, потолка, окон, дверей, радиаторов, вентиляторов, кондиционеров и других); f_{pi} – угловой фактор между человеком (p) и поверхностью (i) (стенами, полом, потолком, окнами, дверью, радиаторами и др.).

Таблица 1. Коэффициенты, учитывающие влияние излучающих поверхностей на человека в зависимости от его положения [9]

| | f_{max} | A | B | C | D | E |
|----------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Сидит, стены | 0.118 | 1.216 | 0.169 | 0.717 | 0.087 | 0.052 |
| Сидит, пол и потолок | 0.116 | 1.396 | 0.130 | 0.951 | 0.080 | 0.055 |
| Стоит, стены | 0.120 | 1.242 | 0.167 | 0.616 | 0.082 | 0.051 |
| Стоит, пол и потолок | 0.116 | 1.595 | 0.128 | 1.226 | 0.046 | 0.044 |

Основу информационных технологий составляют класс математических моделей теплообмена и терморегуляции человека [10]. Величина теплообмена излучением зависит от значения средней радиационной температуры. Для определения которой, необходимо рассчитать фактор проекции, учитывающий степень влияния поверхности (стен, пола, потолка, окон, дверей, радиаторов, вентиляторов, кондиционеров и других) на человека [8].

Математические модели положены в основу построения информационных технологий в среде Borland C++Builder-6. Программа содержит три базовых класса: ЧЕЛОВЕК, ОДЕЖДА, СРЕДА, каждый из которых имеет свои базы данных и алгоритмы. МЕНЮ позволяет выбрать условия вычислительного модельного эксперимента. Результаты моделирования представляются в графическом и табличном виде (рис. 1).

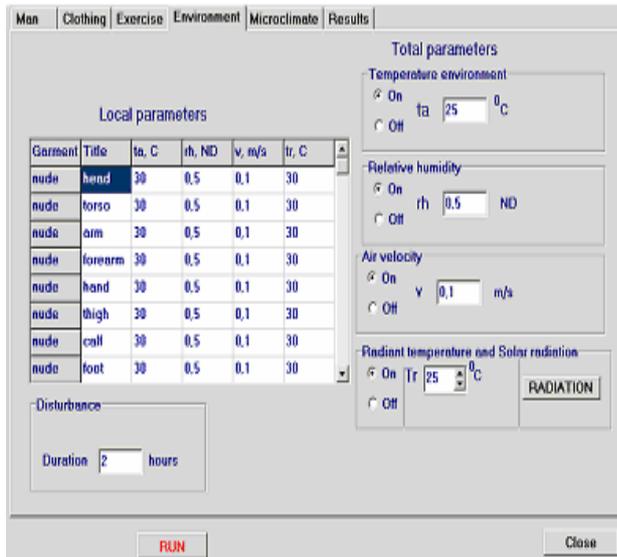


Рис. 1. Основная форма программы: ввод основных характеристик

Для проведения модельного эксперимента нужно ввести характеристики человека, характеристику его одежды, мощность физической нагрузки и параметры окружающей среды: температура воздуха помещения, влажность воздуха и скорость движения воздуха.

Модель предоставляет возможность точного расчёта влияния факторов проекции между человеком и поверхностью (стенами, полом, потолком,

окнами, дверью, радиаторами и др.) на теплообмен человека со средой. Каждая поверхность, с которой взаимодействует человек стена, пол и потолок разделены на четыре части [11]. Вводится длина, ширина, высота помещения, а также расстояние от поверхности стен, пола, потолка до человека. Следующим этапом моделирования является расчет средней радиационной температуры на основании полученных коэффициентов, отражающих степень влияния факторов проекции стен, пола, потолка и локальных температур стен, пола, потолка. Можно моделировать наличие в комнате окон, радиаторов, и др. нагревательных либо охлаждающих элементов.

После того, как были выбраны условия пребывания человека в помещении, можно прогнозировать состояние человека в выбранных условиях – решение практических задач с помощью компьютерной модели. Модель можно применять для анализа состояния человека в машине, в кабине самолёта, в цеху и т.д. Компьютерная модель позволяет получить динамику более 150 параметров, характеризующих физиологическое состояние человека.

Модельные эксперименты

Проведена серия вычислительных экспериментов. Средняя радиационная температура зависит от температур стен, пола и потолка. Моделировалась ситуация: лето, офисное помещение в котором жарко.

Контрольный эксперимент. В модель были введены следующие характеристики человека: вес 70 кг; рост 170 м; площадь поверхности тела 1,8 м²; метаболизм 150 Вт. Человек одет в хлопчатобумажный костюм, термоизоляция ткани которого равна 0,0037 [м²·°C/Вт] и испарительное сопротивление 0,0066 [м²·кПа/Вт]. Характеристики помещения: офисный кабинет, высота – 3 м, длина – 10 м и ширина – 4 м. Температура воздуха $T_e = 24$ °C, температуры стен, пола и потолка – одинаковы, равны 24 °C, человек сидит в середине комнаты, стены, пол и потолок находятся друг к другу под углом 90°, скорость движения воздуха в комнате $v = 0,1$ м/с, относительная влажность воздуха в комнате $rh = 30$ %. Расчётная средняя радиационная температура равна 24 °C. Средняя

температура кожи равна 35,6 °С, температура крови в установившемся режиме равна 36,9 °С, радиационный и конвективный тепловые потоки в установившемся режиме соответственно равны 34 ккал/ч и 29 ккал/ч (табл. 2, рис. 2).

Эксперимент № 1. Человек находится в середине комнаты. Температура фронтальной стены равна 30°С, так как это солнечная сторона, а температуры всех остальных стен, пола и потолка равны 24 °С (табл. 2). Результаты модельного эксперимента показали, что средняя радиационная температура равна 25,7°С. Теплообмен излучением человека со средой 33 ккал/ч, конвективный теплообмен 34 ккал/ч (рис. 2, табл. 2). Наблюдается незначительный нагрев организма, средняя температура кожи увеличилась и стала равной 35,8 °С.

Испарение составляет 392 г/ч, потоотделение 227 ккал/ч (рис. 3).

Частота сердечных сокращений составляет 78 уд/мин, сердечный выброс 510 л/ч.

Эксперимент № 2. В этом эксперименте температура правой, стены равна 35 °С (солнечная сторона), а температуры всех остальных стен, пола и потолка равны 24 °С (табл. 2). Средняя радиационная температура 26,6 °С. Наблюдается больший нагрев организма, по сравнению с предыдущим экспериментом, средняя температура кожи немного повысилась и стала равной 35,9 °С, температура крови повысилась до 37 °С. Теплообмен излучением 31 ккал/ч, а конвективный теплообмен – 38 ккал/ч (рис. 2, табл. 2). Испарение 402 г/ч, потоотделение 233 ккал/ч (рис. 3). Частота сердечных сокращений составляет 79 уд/мин, сердечный выброс – 514 л/ч.

Таблица 2. Результаты моделирования

| Эксп. | Температуры стен | | | | Средняя радиационная температура, °С | Средняя температура кожи, °С | Излучение, ккал/ч | Конвекция, ккал/ч |
|-------|-------------------|--------------|--------------|-------------|--------------------------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|
| | 1 фронтальная, °С | 2 правая, °С | 3 задняя, °С | 4 левая, °С | | | | |
| Конт. | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 35,6 | 34 | 29 |
| 1 | 30 | 24 | 24 | 24 | 25,7 | 35,8 | 33 | 34 |
| 2 | 24 | 35 | 24 | 24 | 26,6 | 35,9 | 31 | 38 |
| 3 | 30 | 30 | 24 | 24 | 27,1 | 36,1 | 25 | 44 |

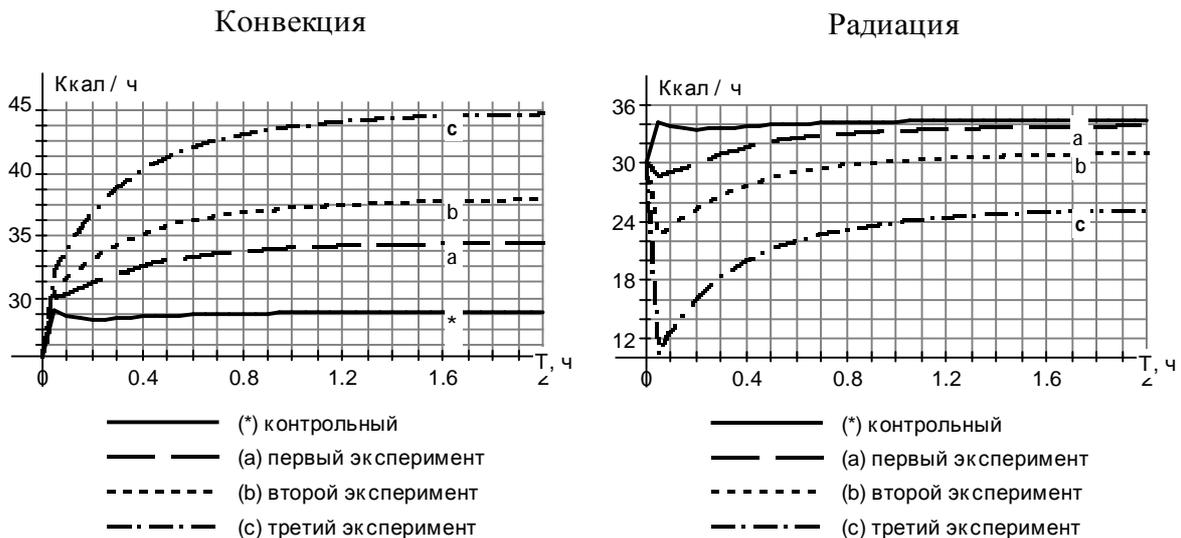


Рис. 2. Динамика конвективного и радиационного тепловых потоков в зависимости от неоднородности температурных условий в комнате:

* – температуры всех стен – 24 °С; а – температура фронтальной 30 °С; b – температура правой 35 °С; c – температуры фронтальной и левой – 30 °С

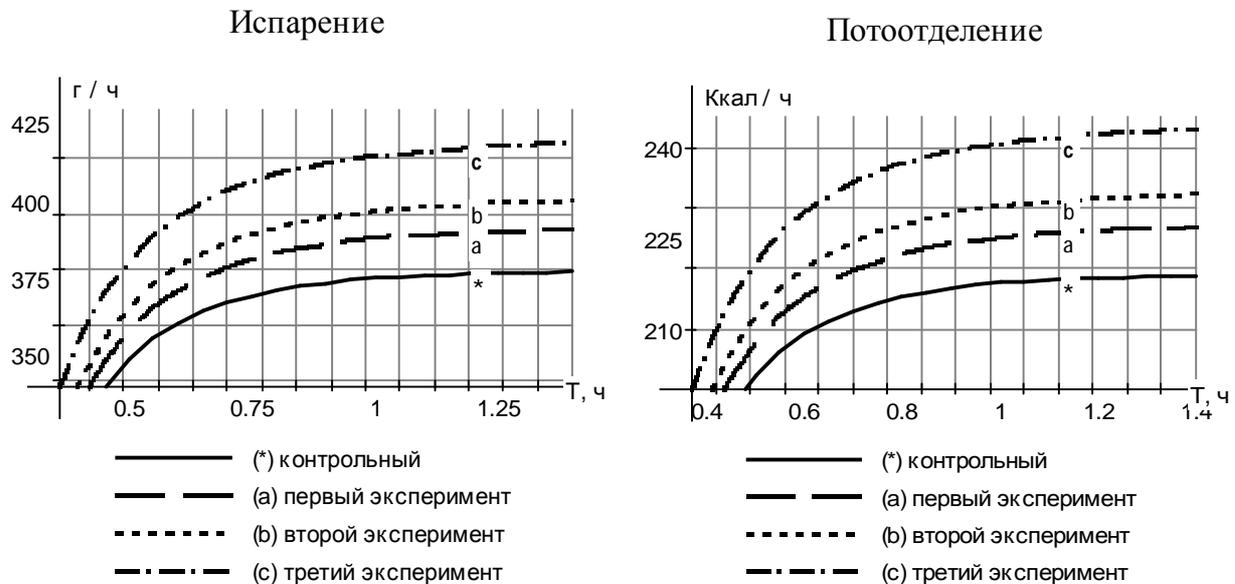


Рис. 3. Динамика испарения и потоотделения при температурной неоднородности помещения

Эксперимент № 3. Температуры фронтальной и правой стен равны 30 °С, окна в комнате с двух сторон, это угловая солнечная комната, температуры задней и левой стен, пола и потолка – равны 24 °С (табл. 2). Рассчитанная средняя радиационная температура 27,1 °С. Наблюдается нагрев организма: средняя температура кожи повысилась и стала равной 36,1 °С. Человек находится в дискомфортных условиях, подвержен нагреву больше, чем в ранее описанных условиях. Температура крови выросла до 37 °С. Это объясняется уменьшением теплообмена излучением 25 ккал/ч (рис. 2), испарение увеличилось до 421 г/ч, потоотделение – 244 ккал/ч (рис. 3). Сердечный выброс составляет 520 л/ч.

Выводы

Разработана модель влияния длинноволновой радиации на человека в помещении, позволяющая прогнозировать его функциональное состояние. Информационная технология учитывает физиологические характеристики человека, одежду и уровень физической активности, соответствующий его профессиональной деятельности, а также характеристики среды – температура воздуха, скорость движения воздуха и влажность воздуха.

Разработана математическая модель, учитывающая размеры помещения и местонахождение человека для определения теплообмена со средой излучением. Модель учитывает факторы проекции стен, потолка и пола.

Проведение модельных экспериментов показало, что даже незначительные изменения условий помещения вызывают изменение теплообмена излучением. Величина теплового потока излучением влияет на температурный комфорт или дискомфорт человека

Литература

1. E. Z. E. Conceição and M^a. M. J. R. Lúcio Indoor heat exchanges by radiation between occupants and surrounding surfaces. 7th International Thermal Manikin and Modeling Meeting – University of Coimbra, September 2008, 4 p.
2. Zhang H., Huisenga C., Arens E., Yu T. Considering individual physiological differences in a human thermal model. Journal of Thermal Biology # 26, pp. 401 – 408, 2001.
3. Haslam R.A. and Parson K.C. A comparison of models for predicting human response to hot and cold environments. Ergonomics vol. 30, No. 11, pp. 1599 – 1614, 1987.
4. Stolijk J.A.J., Hardy J.D. Control of body temperature. In Handbook of Physiology, Section 9: Reactions to Environmental Agent (American Physiological Society, Bethesda, MD), Chapter 4, pp. 45 – 68, 1977.
5. Hodder S., Parson K. Initial thermal sensation responses to simulated solar radiation. 13th International Conference on Environmental Ergonomics. BOSTON, MASSACHUSETTS, USA, pp. 230 – 235, 2009.
6. Thake C.D., Simons C. Physiological, perceptual and cognitive responses to conducting nuclear decommissioning related activities when wearing a pressurised breathing air suit (PBAS) in moderate and hot conditions. 13th International Conference on Environmental Ergonomics. BOSTON, MASSACHUSETTS, USA, pp. 189 – 194, 2009.
7. Akira Kato, Yumi Hirasawa, Syohei Morimoto, Takashi Kubo, Sayaka Sugano, Masashi Kuramae, Takafumi Maeda and Shintaro Yokoyama. The effect of floor heating system on

- physiological and psychological responses in sitting posture with throwing legs. 13th International Conference on Environmental Ergonomics. BOSTON, MASSACHUSETTS, USA, pp. 121 – 127, 2009.
8. *Ермакова И.И.*, Богатёноква А.И. Динамическая модель оценки температурного комфорта человека. Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники», ч. 2, – Киев, НТУУ «КПИ», 2008, с. 81 – 85.
 9. *ISO 7726:1998 (F)* Ergonomie des ambiances thermiques – Appareils de mesure des grandeurs physiques, 2005, pp.1 – 54.
 10. *Yermakova I.* Mathematical modeling of thermal processes in man for development of protective clothing. – Journal of the Korean society of living environmental system, vol. 8, No. 2, September 2001, pp. 127 – 133
 11. *Ермакова И.И.*, Богатёноква А.И. Информационно-аналитическая модель для прогноза теплового состояния человека. Управляющие Системы и Машины, № 3, май – июнь – Киев, 2008, с. 40 – 45.