

Расчеты были проведены до момента окончания действия лазерного импульса. В таблице приведены параметры счета задач для 2D и 3D расчетов.

Параметры счета

	2D	3D
Число процессоров	160	800
Число частиц лазерного источника	100	1000
Число частиц объемного источника	100	100
Время счета (календарных часов)	70	3000
Эффективность	~ 97 %	~ 90 %

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать следующие заключения:

- создан трехмерный вариант методики МИММК, расширяющий возможности численного моделирования экспериментов на лазерных установках;
- расчеты задачи в двумерной и трехмерной постановке по методике МИММК дали согласованные результаты;
- несмотря на высокую эффективность трехмерных расчетов, двумерная методика МИММК остается актуальной в силу своей экономичности.

Литература

1. Моренко Л. З., Рябикина Н. А., Кибкало А. А. Моделирование спектрального переноса излучения методом Монте-Карло в режиме параллельных вычислений // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2001. Вып. 4. С. 42–47.
2. Моренко Л. З., Рябикина Н. А., Кибкало А. А. Моделирование методом Монте-Карло спектрального переноса излучения в режиме неравновесного горения в комплексе МИМОЗА (программа МИММК) // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 2. С. 41–51.
3. Бабанов А. В., Бельков С. А., Бондаренко С. В. и др. Методика МИМОЗА-НДЗД. Расчет трехмерных задач спектрального переноса излучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2012. Вып. 2. С. 64–72.
4. Елисеев Г. М., Жильникова Н. Н., Тихонов А. В. Программа ПЕРСТ-3.1. Некоторые результаты расчетов // VI научно-техническая конференция «Молодежь в науке»: сб. докл. Саров, 2–4 ноября, 2004. С. 45–48.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОКОМФОРТА ЧЕЛОВЕКА В МОДУЛЕ ЛОГОС. АЭРОДИНАМИКА

Н. Г. Галанов, Р. Н. Жучков

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

В повседневной жизни люди проводят достаточно много времени в закрытых пространствах, имеющих различные системы кондиционирования, предназначенные для обеспечения комфортных условий, т.е. состояния теплокомфорта. При проектировании новых систем кондиционирования априорная экспериментальная оценка теплового комфорта представляется сложной и дорогостоя-

шей задачей. Численное моделирование теплокомфорта человека позволяет упростить и удешевить разработку систем кондиционирования зданий, салонов автомобилей и самолетов.

Моделирование теплокомфорта подразумевает построение модели теплообмена человеческого тела с внешней средой. Модель должна учитывать различные процессы, такие как конвекция, излучение, испарение, возникающие при соприкосновении кожи с воздухом. В зависимости от характеристик воздушной среды, тело человека автоматически подстраивается под внешние условия, уменьшая или увеличивая отвод тепла. В настоящее время общепринятая модель энергетического баланса тела принята как стандарт ASHRAE Standard 55 [0].

В докладе представлено описание реализованной модели TCM (Thermal Comfort Model) и результаты расчетов некоторых задач, проведенных в модуле ЛОГОС.Аэродинамика.

1. Основные факторы, определяющие теплообмен тела человека с внешней средой

Для поддержания термокомфорта в организме протекают процессы, обеспечивающие выполнение следующих условий: термальный нейтралитет между температурой кожи и температурой внутри тела (термокомфорта); тепло, производимое при метаболизме, равно сумме потерь тепла телом (энергетический баланс тела).

Можно выделить факторы, влияющие на теплоотдачу телом тепла:

1. Окружающие	2. Индивидуальные	3. Способствующие
<ul style="list-style-type: none"> • Температура воздуха внешней среды t_a; • движение воздуха; • радиационная температура \bar{t}_r; • влажность воздуха RH 	<ul style="list-style-type: none"> • Величина метаболического обмена M; • теплоизоляция одежды 	<ul style="list-style-type: none"> • Еда и питье; • оклиматизация; • форма тела; • подкожный жир; • возраст и пол; • закалка (здоровье)

Окружающие факторы имеют большое влияние на отдачу телом тепла и слабо зависят от человека. Индивидуальные факторы позволяют самому человеку регулировать теплоотдачу в большую или меньшую сторону. Способствующие факторы также являются важными, но в случае численного моделирования теплокомфорта не учитываются.

Рассматривая индивидуальные факторы, можем установить следующее, что обмен веществ в человеческом теле напрямую зависит от активности мышц. Традиционно обмен веществ измеряется в единицах метаболизма ($1 \text{ met} = 58,15 \text{ Вт/м}^2$). Взрослый человек, среднего роста и телосложения, имеет площадь кожи $1,7 \text{ м}^2$ и вес 70 кг. В табл. 1 представлены зависимость значений величины метаболизма от уровней активности человека [0].

Таблица 1

Величина уровня метаболизма в зависимости от деятельности

Деятельность	Метаболизм	
	<i>met</i>	Вт/м ²
Сон	0,7	40
Полулежать	0,8	46
Спокойно сидеть	1,0	58
Стоять	1,2	70
Очень легкая работа (ходить по магазинам, готовить еду)	1,6	93
Средняя работа (водить машину)	2,0	116
Продолжительная средняя работа (ганцевать)	3,0	175
Тяжелая работа (играть в теннис, футбол, заниматься гиревым спортом)	7,0	350

Нужно отметить, что внутренняя температура тела не зависит от уровня метаболизма и остается равной 37 °С, в то время как температура кожи может варьироваться от 31 °С до 34 °С.

Следующим фактором, влияющим на теплообмен с внешней средой, является уровень одежды. Он сокращает потерю тепла телом и классифицируется согласно величине теплоизоляции. Единицей измерения теплоизоляции одежды принимается Clo ($1 Clo = 0,155 \text{ м}^2\text{°С/Вт}$).

Шкала данной единицы измерения принимается следующей: при значении 0,0 Clo считается, что на теле человека нет никакой одежды; при значении 1,0 Clo считается, что человек одет в обычный деловой костюм.

В табл. 2 представлены примеры одежды и их величины теплоизоляции.

Таблица 2

Уровни теплоизоляции одежды

Мужчины		Clo	Женщины		Clo
Рубашка или футболка	Легкая, короткие рукава	0,14	Блузка	Легкая	0,2
	Теплая, короткие рукава	0,25	Платье	Легкое	0,22
Жилет	Легкий	0,15	Юбка	Легкая	0,1
	Теплый	0,29		Теплая	0,22
Брюки	Легкие	0,26	Брюки	Легкие	0,26
	Теплые	0,32		Теплые	0,44
Свитер	Легкий	0,2	Свитер	Легкий	0,17
	Теплый	0,37		Теплый	0,37
Куртка	Легкий	0,22	Куртка	Легкая	0,17
	Теплый	0,49		Теплая	0,37
Носки	До лодыжки	0,04	Колготки	Тонкие	0,01
Обувь	Ботинки	0,04	Обувь	Туфли	0,04

При наличии на участке тела нескольких уровней одежды приведенные значения суммируются.

2. Модель теплокомфорта

Для моделирования процессов теплообмена автором [2] было выведено уравнение теплового баланса тела:

$$S = M \pm W \pm R \pm C \pm K - E - RES,$$

где S – сохраненное телом тепло, M – метаболизм, W – внешняя работа, R – радиационный тепловой поток, C – конвективный тепловой поток, K – тепловой поток с учетом проводимости одежды, E – теплопотеря при испарении, RES – теплопотеря при дыхании.

Ниже представлены основные уравнения, описывающие тепловой комфорт по модели [2]:

$$(M - W) - E_d - E_{sw} - E_{res} - C_{res} = 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \left\{ (t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right\} - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - R_{cl} [(M - W) - E_d - E_{sw} - E_{res} - C_{res}]$$

$$E_d = 3,08853 \cdot 10^{-3} (p_{sk} - p_a)$$

$$E_{sw} = 0,42(M - 58,15)$$

$$E_{res} = 1,73 \cdot 10^{-5} M (5834 - p_a)$$

$$C_{res} = 1,43 \cdot 10^{-3} M (34 - t_a)$$

$$p_a = RH \cdot e^{[23,5613 - 4030,183/(t_a + 235)]} / 100\%$$

$$p_{sk} = 256t_{cl} - 3373$$

$$\bar{t}_r = \sqrt[4]{\sum_n F_{p-i} (t_i + 273)^4} - 273$$

$$R_{cl} = 0,155 I_{cl}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,0 + 0,2 I_{cl} & \text{для } I_{cl} < 0,5 clo \\ 1,05 + 0,1 I_{cl} & \text{для } I_{cl} > 0,5 clo \end{cases}$$

$$Q_c = h_c f_{cl} (t_{cl} - t_a)$$

$$Q_r = h_r f_{cl} (t_{cl} - \bar{t}_r)$$

$$h_c = 2,381 (t_{cl} - t_a)^{0,25}$$

$$h_r = 4 \varepsilon \sigma f_{eff} \left[273,15 + (t_{cl} + \bar{t}_r) / 2 \right]^3$$

где $f_{eff} = 0,725$, $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$, $\varepsilon = 0,95$.

Здесь h_c – коэффициент конвективной теплоотдачи ($\text{Вт/м}^2\text{°С}$), h_r – коэффициент радиационной теплоотдачи ($\text{Вт/м}^2\text{°С}$), t_{cl} – температура кожи/одежды ($^{\circ}\text{С}$), \bar{t}_r – средняя радиационная температура ($^{\circ}\text{С}$), t_i – температура поверхности i ($^{\circ}\text{С}$), F_{p-i} – угол между человеком и поверхностью i ($\sum F_{p-i} = 1$), t_a – температура атмосферы вдали от кожи ($^{\circ}\text{С}$), p_a – давление паров воды вдали от кожи (Па), p_{sk} – давление паров воды рядом с кожей (Па), RH – влажность воздуха в %, I_{cl} – тепловая изоляция одежды (Clo).

Для расчета задачи методом TCM применялся следующий алгоритм (рис. 1).

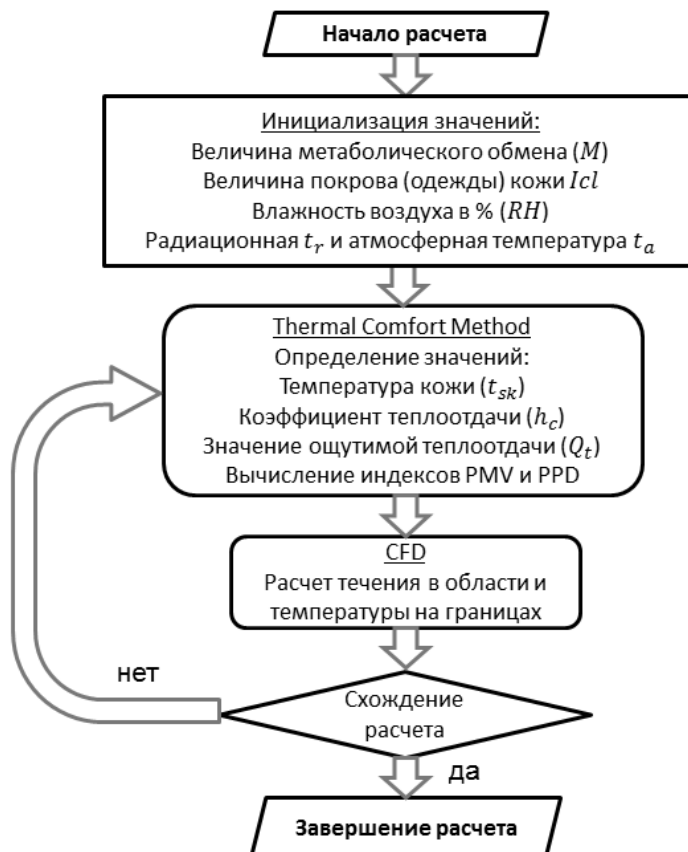


Рис. 1. Алгоритм решения задачи методом TCM в ЛОГОС

Для определения температуры кожи на каждом счетном шаге применялась следующая формула, также предложенная автором [2]:

$$t_{sk} = t_{cl} = 36,4 - 0,054Q_t.$$

3. Индексы PMV и PPD

Для оценки воздействия окружающей среды на человека используется индекс субъективных ощущений комфорта (PMV – Predicted Mean Vote) и процент дискомфорта (PPD – Predicted Percentage Dissatisfied) [9].

Многие исследователи используют семиуровневую шкалу индекса субъективных ощущений:

- +3 Жарко
- +2 Тепло
- +1 Слегка тепло
- 0 Нейтрально
- 1 Слегка прохладно
- 2 Прохладно
- 3 Холодно

Значения индекса субъективных ощущений вычисляется следующим образом [11]:

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028] \left\{ (M - W) - 3,08853 \cdot 10^{-3} [256 \cdot t_{cl} - 3373 - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] - 1,73 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0,0014M (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right\}.$$

PMV-PPD индекс используется для моделирования температуры окружающей среды и применяется в стандарте ISO 7730 [0]. PPD вычисляется из PMV следующим образом:

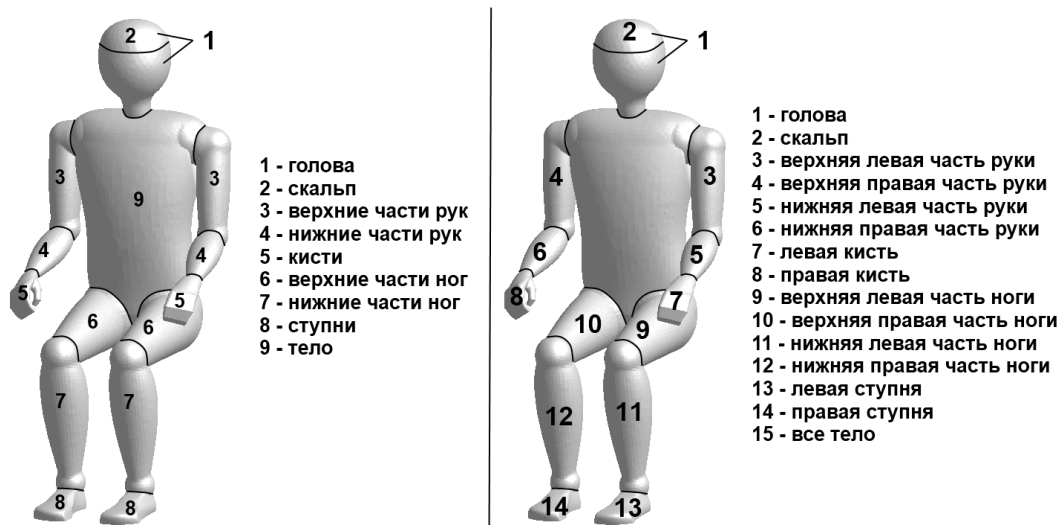
$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2).$$

4. Численные эксперименты

4.1. Результаты расчета задачи моделирования теплообмена манекена человека с окружающей средой

Проводились расчеты обтекания потоком воздуха манекена человека, находящегося в замкнутой области. Область, в которой находился манекен, имеет следующие размеры: $2,44 \times 2,46 \times 1,2$ м (длина×высота×ширина) [3]. Набегающий поток имеет температуру $20,4$ °С и скорость $0,27$ м/с. Температура стен комнаты устанавливалась равной 21 °С. В первом расчете на поверхности манекена задавалась фиксированная температура, равная 34 °С; во втором расчете температура на всех участках манекена температура на поверхности определялась через уровень метаболизма, равный $1,0$, и уровень одежды, равный 0 . По результатам расчета оценивалась скорость воздуха в контрольных точках, а также тепловой поток на различных участках тела манекена (рис. 2).

На рис. 3 представлено распределение полного теплового потока в зависимости от частей тела (рис. 2 (слева)), полученное в расчетах в комплексе ЛОГОС, в сравнении с экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов [4].



2. Участки тела для снятия значений полной теплоотдачи (слева) и коэффициента теплоотдачи (справа)

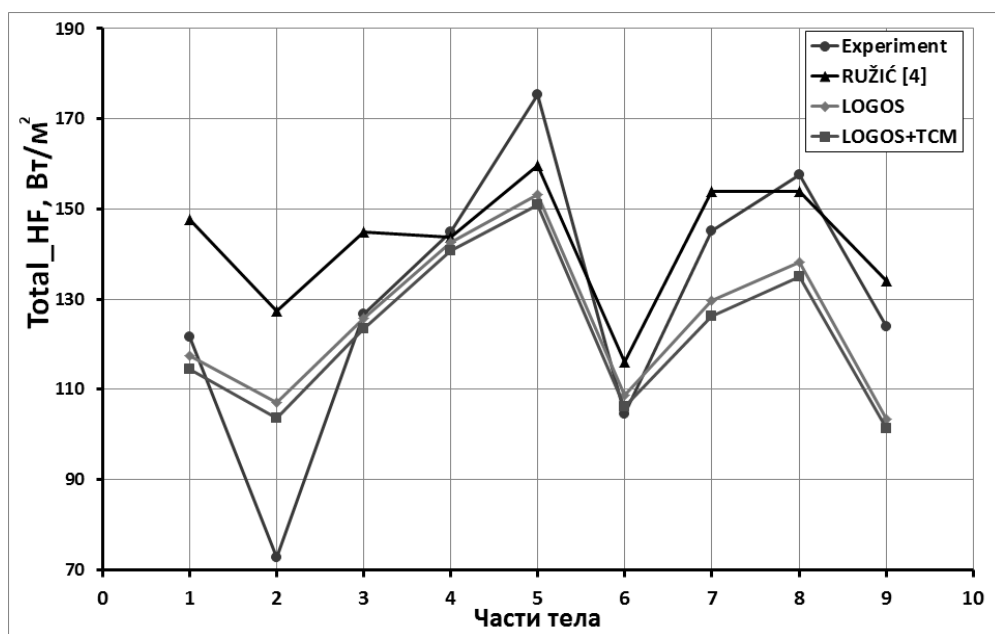


Рис. 3. Зависимость полной теплоотдачи от частей тела

На рис. 4 представлен график распределения коэффициента теплообмена в зависимости от частей тела (рис. 2 (справа)):

$$h_c = HF / (t_{cl} - t_a),$$

где HF – теплоотдача от участка тела, t_{cl} – температура кожи/одежды ($^{\circ}\text{C}$), t_a – температура атмосферы вдали от кожи ($^{\circ}\text{C}$).

На рис. 5 представлен график распределения скорости потока за манекеном. Построение графика производилось по прямой линии, проходящей в вертикальной плоскости за манекеном и на расстоянии от начала области 2,19 м.

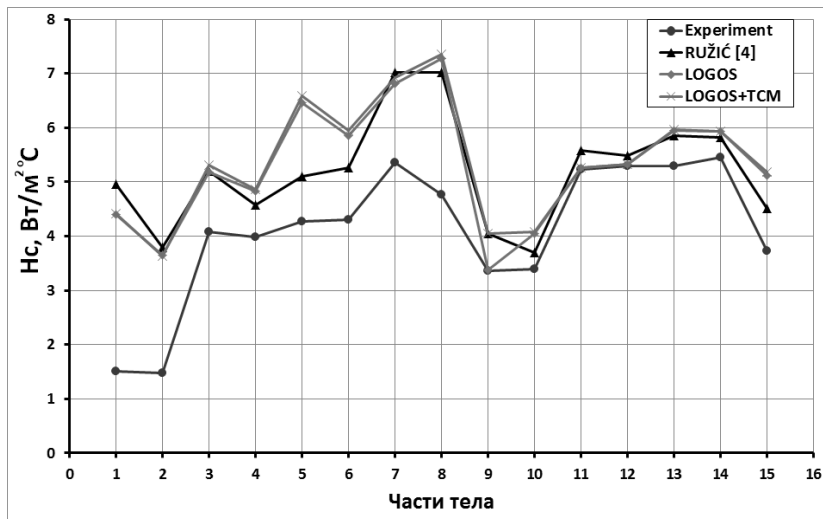


Рис. 4. График распределения коэффициента теплоотдачи в зависимости от участков тела

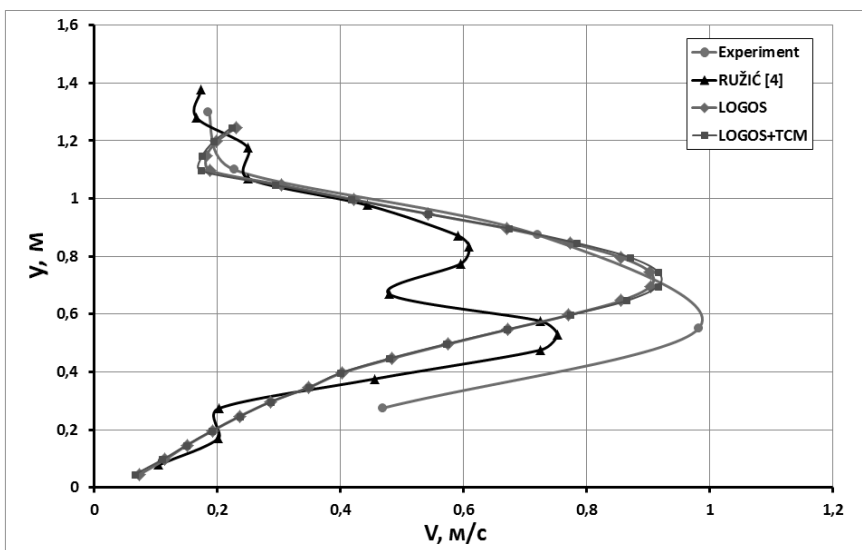


Рис. 5. График скорости потока за манекеном по вертикальной оси Oy на расстоянии $x = 2,19$ м от начала области

На рис. 60 представлены распределения скорости и температуры в продольном сечении расчетной области.

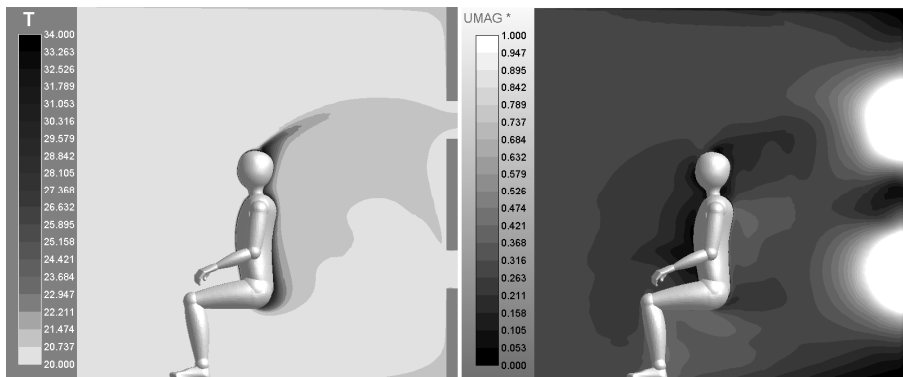


Рис. 6. Распределения температуры и скорости в области вокруг манекена в продольном сечении

4.2. Результаты решения задачи определения уровня термокомфорта салона пассажирского лайнера

Был проведен расчет течения воздуха в салоне самолета с находящимися в нем 95 пассажирами. На входе в расчетную область задавался массовый расход, равный $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Температура воздуха устанавливалась, равной $20 \text{ }^\circ\text{C}$. На телах людей принималось, что уровень метаболизма равен 1,0 и уровень одежды равен 0,6 на всех частях тела, кроме головы. Результаты расчета представлены на следующих рисунках. На рис. 7–9 приведены полученные распределения скорости и температуры в салоне самолета. Рис. 10 показывает распределение уровня комфорта (PMV) на телах манекенов.

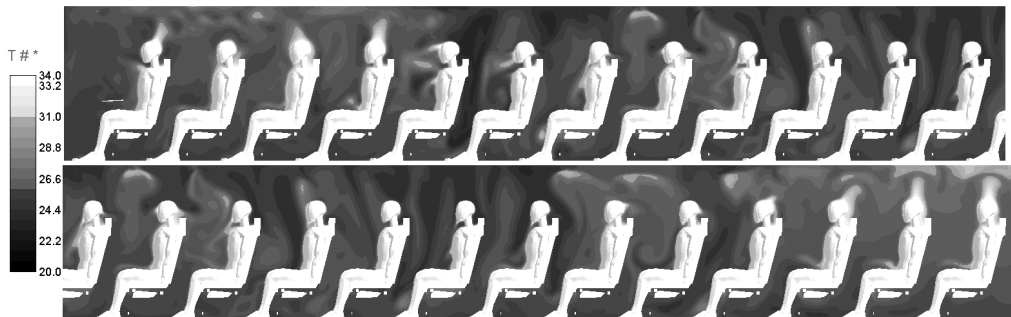


Рис. 7. Распределения температуры в продольном сечении

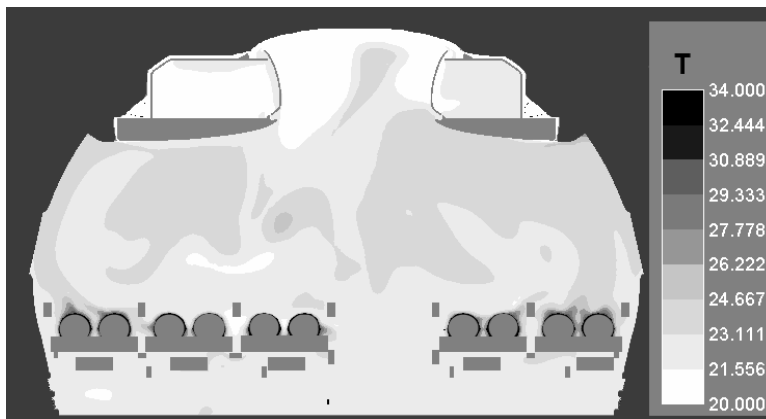
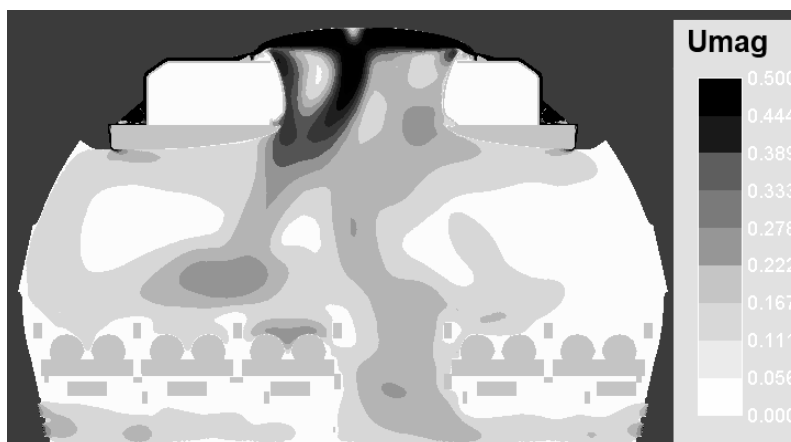


Рис. 8. Распределения температуры в поперечном сечении



9. Распределения скорости потока в поперечном сечении

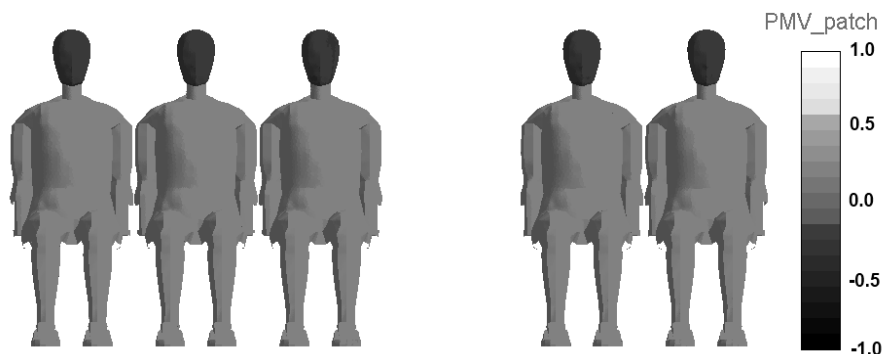


Рис. 10. Уровни комфорта на телах пассажиров

Анализируя полученные результаты, можно говорить о том, что используется довольно удачная система кондиционирования, т. к. уровень термокомфорта пассажиров составляет в среднем $PMV = 0,5$ при средней температуре воздуха в салоне $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, что по семиуровневой шкале соответствует состоянию «нейтрально».

Литература

1. ASHRAE American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Standart 55, «Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy», Atlanta, 2004.
2. Fanger P. O. Thermal Comfort; Analysis and Application in Environmental Engineering. N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1973.
3. Nilsson H. O., Brohus H., Nielsen P. V. Benchmark Test for a Computer Simulated Person – Manikin Heat Loss for Thermal Comfort Evaluation, Aalborg University, Denmark, and Gavle University, Sweden, 2007.
4. Ružić D. A., Bikić S. M. An Approach to the modelling of a virtual thermal manikin // Thermal Science. 2014. Vol. 18, N 4. P. 1413–1423.
5. Gao N. P. Numerical and Experimental Study of Personalized Ventilation. Department of Building Services Engineering. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University. 2006.
6. ASHRAE: Physiological principles and thermal comfort. ASHRAE handbook of fundamentals. Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 1993.
7. Zhu S., Murakami S. et all. Study on inhalation region by means of CFD analysis and experiment // Building and Environment. 2004. 40. P. 1329–1336.
8. Brohus H. Personal Exposure to Contaminant Sources in Ventilated Rooms. Denmark: Aalborg University, 1997.
9. International standard. ISO 7730. Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. 1994.
10. Auliciems A., Szokolay S. V. THERMAL COMFORT. PLEA: Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture. Brisbane 4072: The University of Queensland, 2007.
11. Olesen B. W. Thermal Comfort // Technical Review, N 2. 1982.
12. Holopainen R. A human thermal model for improved thermal comfort. Espoo 2012. VTT Science 23. P. 141.