

УДК 536.244

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТА В ПОМЕЩЕНИИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ПЛАВУЧЕСТИ**

**Калбекова<sup>1</sup> М. Ж., Курбаналиев<sup>1</sup> А.Ы.**

<sup>1</sup>Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан

Качество воздуха в помещениях играет важную роль в качестве фактора, определяющего состояние здоровья человека - оно связано со здоровьем и комфортом обитателей здания. В настоящей работе исследуются показатели естественной вентиляции в помещении кафедры Общей физики и Методики преподавания физики Ошского государственного университета. Получены условия теплового комфорта в терминах возраста воздуха и переменных PMV, PPD. Моделирование проведено с использованием решателя buoyantSimpleFoam пакета OpenFOAM.

**Ключевые слова:** тепловой комфорт, метод Фангера, уравнения PMV, PPD, OpenFOAM, buoyantSimpleFoam.

## **КАЛКЫМА КУБУЛУШУН ЭСКЕ АЛУУ МЕНЕН БӨЛМӨНҮН ЖЫЛУУЛУК ЫҢГАЙЛУУЛУГУН МОДЕЛДӨӨ**

**Калбекова<sup>1</sup> М. Ж., Курбаналиев<sup>1</sup> А.Ы.**

<sup>1</sup>Ош мамлекеттик университети, Ош шаары, Кыргызстан

Ички абанын сапаты адамдын ден - соолугунун абалын аныктоочу фактор катары маанилүү ролду ойнойт-бул имараттын жашоочуларынын ден-соолугуна жана ыңгайлуулугуна байланыштуу. Бул эмгекте Ош мамлекеттик университетинин Жалпы физика жана физиканы окутуу методикасы кафедрасынын ичиндеги табигый желдетүү көрсөткүчтөрү изилденген. Жылуулук комфортунун шарттары абанын жашы жана PMV, PPD чоңдуктары аркылуу алынды. Моделдөө OpenFOAM пакетинин buoyantSimpleFoam решателинин жардамында жүргүзүлдү.

**Баштапкы сөздөр:** жылуулук ыңгайлуулугу, Фангер ыкмасы, PMV, PPD теңдемелери, OpenFOAM, buoyantSimpleFoam.

## **CALCULATION OF THERMAL COMFORT IN THE ROOM TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF BUOYANCY**

**Kalbekova<sup>1</sup> M. Zh., Kurbanaliev<sup>1</sup> A.Y.**

<sup>1</sup>Osh State University, Osh, Kyrgyzstan

Indoor air quality plays an important role as a factor determining the state of human health - it is related to the health and comfort of the inhabitants of the building. In this paper, the indicators of natural ventilation in the premises of the Department of General Physics and Methods of Teaching Physics of Osh State University are investigated. Thermal comfort conditions are obtained in terms of air age and variables PMV, PPD. The simulation was carried out using the buoyantSimpleFoam solver of the OpenFOAM package.

**Keywords:** thermal comfort, Fanger method, PMV and PPD equations, OpenFOAM, buoyantSimpleFoam.

**Введение:** Качество воздуха в помещениях играет важную роль в качестве фактора, определяющего состояние здоровья человека - оно связано со здоровьем и комфортом обитателей здания. Уравнение теплового комфорта было установлено Фангером в 1970-х годах [1-3]. Оно представляет собой комбинированную количественную комбинацию переменных окружающей среды и индивидуальных переменных. Прогнозируемый средний голос (PMV) в результате «уравнения комфорта Фангера» показывает, как пассажиры оценивают климат. Используя PMV, можно предсказать процент неудовлетворенных людей (PPD) [2]. Общая цель систем ОВКВ состоит в том, чтобы обеспечить более комфортные внутренние помещения и приемлемое качество воздуха в помещении [3-5]. Результаты PMV показывают, является ли среда комфортной или нет.

Тепловой комфорт - это комбинация факторов окружающей среды и индивидуальных факторов, которые используются в уравнении PMV Фангера.

На степень теплового комфорта для человека влияют шесть параметров, представленные схематически ниже на рис. 1.



Рис. 1 - Параметры теплового комфорта

Переменными окружающей среды для теплового комфорта являются температура воздуха, средняя температура излучения, относительная скорость воздуха и относительная влажность.

Уравнение PMV представляет собой количественную комбинацию активности, одежды, температуры воздуха, средней температуры излучения, скорости воздуха и относительной влажности [1]:

$$PMV = \left( 0.352 * e^{-0.042 \left( \frac{M}{A_{Du}} \right)} + 0.032 \right) * \left[ \frac{M}{A_{Du}} * (1 - \eta) - 0.35 * \left[ 43 - 0.061 * \frac{M}{A_{Du}} * (1 - \eta) - \rho_{\alpha} \right] - 0.42 * \left[ \frac{M}{A_{Du}} * (1 - \eta) - 50 \right] - 0.023 * \frac{M}{A_{Du}} (44 - \rho_{\alpha}) - 0.0014 * \frac{M}{A_{Du}} * \right]$$

$$(34 - T_{\alpha}) - 3.4 * 10^{-8} * f_{cl} * [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4] - f_{cl} * h_c * (T_{cl} - T_{\alpha})$$

$$T_{cl} = 35.7 - 0.032 * \frac{M}{A_{Du}} * (1 - \eta) - 0.18 * I_{cl} * [3.4 * 10^{-8} * f_{cl} * [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4] + f_{cl} * h_c * (T_{cl} - T_{\alpha})]$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\tau) + \vec{\nabla} \cdot (\vec{u}\tau) - \vec{\nabla} \cdot \left( \frac{v_{eff}}{\sigma_r} \vec{\nabla} \tau \right) = 1$$

**Постановка задачи.** Геометрия задачи и система координат показаны на рисунке 2. Модель комнаты имеет длину L=4м, высоту H=2.6м, и ширину W=3м.

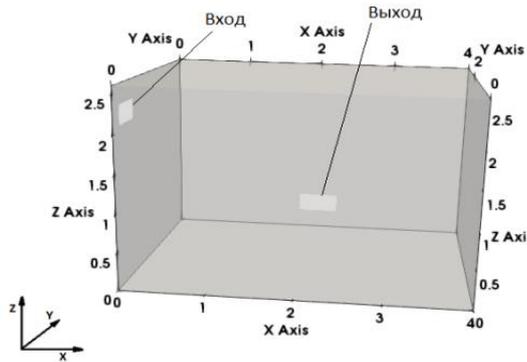


Рис. 2 - Геометрия задачи и система координат

Математическая модель рассматриваемой нестационарной задачи основана на системе уравнений Навье-Стокса, в которую входят уравнения неразрывности, переноса импульса и энтальпии:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) \quad (2)$$

$$= -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot (2\mu_{eff} D(\mathbf{u})) - \nabla \cdot \left( \frac{2}{3} \mu_{eff} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} h) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) = \nabla \cdot (\alpha_{eff} \nabla h) + \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{g} \quad (3)$$

Здесь  $\rho$  – плотность,  $p$  – статическое давление,  $\mathbf{g}$  – вектор гравитационного ускорения,  $\mu_{eff}$  – эффективная вязкость, равная сумме молекулярной и турбулентной вязкостей,  $h$  – энтальпия,  $k = 0.5|\mathbf{u}|^2$  – кинетическая энергия на единицу массы, а  $D(\mathbf{u})$  – тензор скорости деформации определяется как

$$D(\mathbf{u}) = 0.5(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)$$

Коэффициент эффективной температуропроводности  $\alpha_{eff}$  равен сумме коэффициентов ламинарной и турбулентной температуропроводностей:

$$\alpha_{eff} = \frac{\rho\nu_t}{Pr_t} + \frac{\mu}{Pr} = \frac{\rho\nu_t}{Pr_t} + \frac{\kappa}{C_p}$$

где  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности,  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $\mu$  – коэффициент молекулярной динамической вязкости,  $\nu_t$  – турбулентная кинематическая вязкость,  $Pr$  – число Прандтля,  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля

В пакете OpenFOAM, члены в уравнении (2), связанные с градиентом статического давления и вектором гравитационного ускорения записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} -\nabla p + \rho\mathbf{g} &= -\nabla(p_{rgh} + \rho\mathbf{g} \cdot \mathbf{r}) + \rho\mathbf{g} \\ &= -\nabla p_{rgh} - (\mathbf{g} \cdot \mathbf{r})\nabla\rho - \\ &\quad \rho\mathbf{g} + \rho\mathbf{g} \\ &= -\nabla p_{rgh} - (\mathbf{g} \cdot \mathbf{r})\nabla\rho \end{aligned}$$

где  $p_{rgh} = p - \rho\mathbf{g} \cdot \mathbf{r}$ , а  $\mathbf{r}$  – радиус вектор.

Стандартная k- $\epsilon$  -модель турбулентности

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k - \rho\epsilon; \quad \mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} P_k \frac{\epsilon}{k} - \rho C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}$$

**Численная модель.** Дискретизация расчетной области получена при помощи стандартной утилиты blockMesh открытого пакета

OpenFOAM с использованием схемы bounded Gauss upwind для всех неизвестных переменных. Дискретизация уравнений получена при помощи метода контрольных объемов [6-9].

Сведения об использованных граничных условиях, методах дискретизации и решения приведены в следующих табл. 1.-2.

Таблица 1. - Граничные условия для переменных.

Граница Переменная	Стены	Вход	Выход
Скорость, $U$	noSlip	fixedValue uniform(0.2 0 0)	pressureInletOutletVelocity; \$internalField
Температура, $T$	fixedValue; \$internalField	fixedValue; uniform 290	zeroGradient
Давление, $p_{rgh}$	fixedFluxPressure \$internalField	fixedFluxPressure \$internalField	prghPressure p \$internalField
Кинетическая энергия турбулентности, $k$	kqRWallFunction \$internalField	turbulentIntensityKineticEnergyInlet intensity 0.14 \$internalField	inletOutlet \$internalField
Скорость диссипации кинетической энергии турбулентности $\epsilon$	epsilonWallFunction \$internalField	turbulentMixingLengthDissipationRateInlet mixingLength 0.0168 \$internalField	inletOutlet inletValue \$internalField

Таблица 2 - Решатели уравнений для переменных

Переменная	Решатель	Точность
Давления	метод сопряженных градиентов PCG с использованием предобусловителя DIC	$1e^{-8}$
$U, h, k, \epsilon, age$	PBiCGStab с использованием предобусловителя DILU	$1e^{-7}$

**Результаты численных расчетов.** Поток холодного воздуха с температурой 298 К входит через входное отверстие со скоростью 0.2 м/с и вытекает из модели через выходное отверстие.

Распределение вектора скорости приведено на рис. 2. Видно, что, свежий, более холодный воздух сразу после входного отверстия идет вниз, к полу комнаты. Далее доходя правой стенки отражается от нее и дальше идет к выходу, расположенного на задней стенке комнаты.

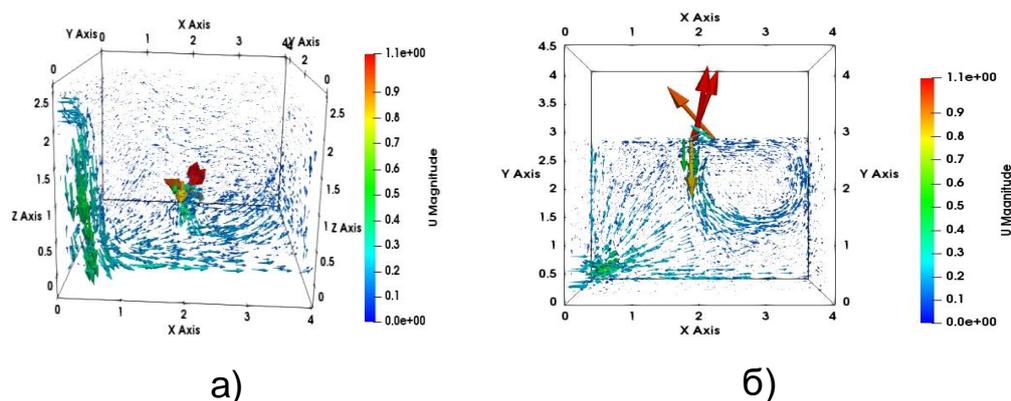


Рис. 2 - Поле вектора скорости – вид спереди (а) и вид сверху (б)

Часть свежего холодного воздуха вытекает через выходное отверстие и идет вниз к полу. Распределение температуры воздушного потока внутри комнаты в сечении  $y=0.5\text{ м}$  приведено на рис. 3.

Видно, что максимальная температура 302К расположена выше высоты 1.5м, а область с наименьшей температурой находится ближе к полу в непосредственной близости передней стенки комнаты. Распределение возраст воздуха age в плоскости  $y=0.5\text{ м}$  приведено на рис. 4.

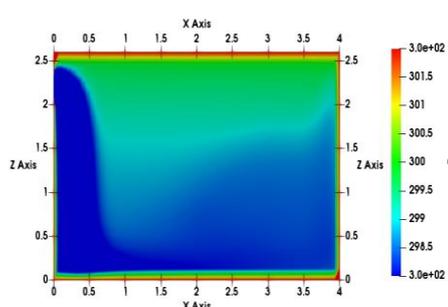


Рис. 3. -Поле распределения температуры

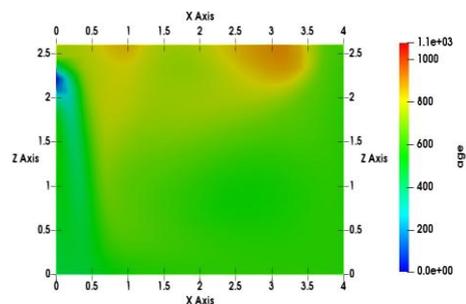


Рис. 4. - Поле распределения возраста воздуха

Распределения прогнозируемых и средней оценки PMV прогнозируемого процента недовольных PPD в сечении  $y=0.5\text{м}$  приведены на рис. 5. Т рис. 6 соответственно.

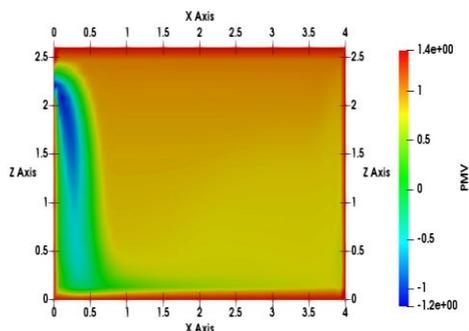


Рис. 5. - Поле распределения  
PMV

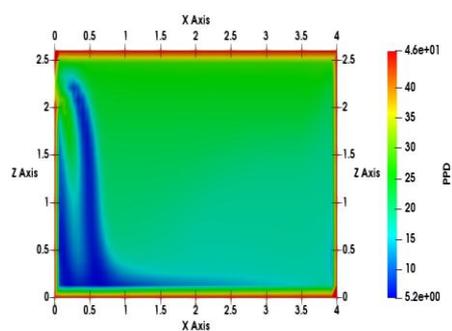


Рис. 6. - Поле распределения  
PPD

**Выводы:** Проведено математическое моделирование теплового комфорта в помещении в рамках пакета OpenFOAM. Комфортная температура для человека зависит от его физической активности, его биологических данных, одежды, а также от температуры воздуха, среднего внешнего теплового излучения, скорости движения и влажности воздуха. Мы провели оценку и измерение этих величин, и спрогнозировали чувствительность тела человека от температуры окружающей среды, путем расчета прогнозируемой средней оценки PMV. Показатель прогнозируемого процента недовольных PPD позволяет получить информацию о тепловом дискомфорте или недовольстве температурой среды на основе прогноза процента людей, которым слишком тепло или холодно в конкретной термальной среде.

Тепловой дискомфорт также может быть вызван локальным охлаждением или нагревом тела человека. Наиболее общими факторами локального дискомфорта являются асимметрия теплового излучения (холодные или теплые поверхности), сквозняк (который определен как локальное охлаждение тела, вызванное движением воздуха), разница в температуре воздуха по вертикали, а также холодные или теплые полы.

Недовольство может быть вызвано дискомфортом, связанным с нагреванием или охлаждением всего тела. Границы комфорта в этом случае описываются с помощью показателей PMV и PPD. Однако недовольство температурой также может быть вызвано факторами локального теплового дискомфорта.

## ЛИТЕРАТУРА

1. International Standart ISO 7740. Third edition. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. 2005.11.15.
2. Фангер П.О. «Тепловой комфорт: анализ и приложения в инженерии окружающей среды», издательство McGraw Hill Book Company, 1970.
3. Фангер П.О. Человеческие потребности в будущих средах с кондиционированием воздуха, International Journal of Refrigeration, 24 (2) (2001) 148-153.
4. Дж. В. Хуф, Сорок лет модели теплового комфорта Фэнгера: комфорт для всех, воздух в помещении, 18 (3) (2008) 182–201.
5. Справочник ASHRAE — основы Глава 9 (2009).
6. OpenFOAM v7 User Guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/userguide-v7/> . (accessed 05.01.2023).
7. Ferziger J. H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer Verlag, 2002, 423 p.
8. S. V. Patankar. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980, 197 p.
9. H. K. Versteeg, W. Malalasekera. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2 nd edition, Pearson education Limited, England, 2007, 517p.