

УДК 536.244

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЕНТИЛЯЦИИ МОДЕЛИ ИНФЕКЦИОННОЙ ПАЛАТЫ

Курбаналиев А.Ы., Абдимуталипова З.К.

Ошский государственный университет,

Изолированные палаты используются во многих инфекционных больницах для лечения тяжелобольных пациентов. Важной особенностью этих палат является то, что в них поддерживается отрицательное давление, что помогает удерживать загрязняющие вещества в палате и не допускать их распространения за её пределы. Математическое моделирование стационарного процесса вентиляции средствами вычислительной гидродинамики проведено в рамках пакета OpenFOAM. Трёхмерная модель инфекционной палаты представляет собой гексаэдр размерами  $4 \times 4 \times 2.6 \text{ м}^3$ , внутри которого находятся три кровати с тремя неподвижными пациентами. Расчетная сетка создана с помощью утилит blockMesh и snappyHexMesh, а дискретизация системы основных уравнений, представляющие законы сохранения массы, импульса и энергии осуществлена при помощи метода контрольных объемов. Проведено исследование влияния отрицательного выходного граничного условия для давления на гидродинамические характеристики течения воздуха в модели инфекционной палаты.

**Ключевые слова.** Отрицательное давление, конвекция, инфекционная палата, вентиляция, OpenFOAM, blockMesh, snappyHexMesh.

## ИНФЕКЦИЯЛЫК ПАЛАТАНЫН МОДЕЛИН ЖЕЛДЕТҮҮ ПРОЦЕССИН МОДЕЛДЕШТИРҮҮ

Курбаналиев А.Ы., Абдимуталипова З. К.

Ош мамлекеттик университети

Көптөгөн инфекциялык ооруканаларда жугуштуу оорулууларды дарылоо үчүн изоляциялык бөлмөлөр колдонулат. Бул бөлмөлөрдүн маанилүү өзгөчөлүгү, алар терс басымды кармап турат, бул бөлмөдө булгоочу заттарды кармап турууга жана алардын бөлмөнүн сыртына

жайылышынын алдын алууга жардам берет. Эсептөө суюктугунун динамикасын колдонуу менен стационардык желдетүү процессин математикалык моделдөө OpenFOAM пакетинин алкагында жүргүзүлдү. Инфекциялык бөлмөнүн үч өлчөмдүү модели  $4 \times 4 \times 2,6$  м<sup>3</sup> өлчөмүндөгү гексаэдр болуп саналат, анын ичинде үч кыймылсыз оорулуу үч керебет бар. Эсептөөчү тор blockMesh жана snappyHexMesh утилиталарынын жардамы менен түзүлүп, массанын, импульстун жана энергиянын сакталуу мыйзамдарын билдирген негизги теңдемелер системасын дискреттөө көлөмү контролдук көлөм ыкмасы менен ишке ашырылган. Жугуштуу оорулар бөлмөсүнүн моделинде аба агымынын гидродинамикалык мүнөздөмөсүнө басымдын терс чыгуу чектик шартынын таасирине изилдөө жүргүзүлгөн.

**Баштапкы сөздөр.** Терс басым, конвекция, инфекциялык палата, желдетүү, OpenFOAM, blockMesh, snappyHexMesh.

## **SIMULATION OF THE VENTILATION PROCESS OF THE INFECTIOUS DISEASES WARD MODEL**

**Kurbanaliev A., Abdimutalipova Z.K.**  
Osh State University

Isolation rooms are used in many infectious diseases hospitals to treat seriously ill patients. An important feature of these rooms is that they maintain negative pressure, which helps keep contaminants in the room and prevent them from spreading outside the room. Mathematical modeling of the stationary ventilation process using computational fluid dynamics was carried out within the framework of the OpenFOAM package. The three-dimensional model of the infectious ward is a hexahedron with dimensions  $4 \times 4 \times 2.6$  m<sup>3</sup>, inside of which there are three beds with three immobile patients. The computational mesh was created using the blockMesh and snappyHexMesh utilities, and the discretization of the system of basic equations representing the laws of conservation of mass, momentum and energy was carried out using the control volume method. A study was carried out of the influence of a negative output boundary condition for pressure on the hydrodynamic characteristics of air flow in a model of an infectious diseases ward.

**Keywords.** Negative pressure, convection, infectious ward, ventilation, OpenFOAM, blockMesh, snappyHexMesh.

**Введение.** Изолированные палаты используются во многих инфекционных больницах для лечения пациентов, страдающих такими заболеваниями, COVID-19, как туберкулез и тяжелый острый респираторный синдром. Очень важно защитить врачей, медсестер и других медицинских работников от инфекционных заболеваний с

помощью эффективной системы вентиляции инфекционной палаты. Соответствующий контроль за давлением и направлением воздушного потока в инфекционных палатах позволяет эффективно изолировать инфицированных пациентов и препятствовать распространению загрязненного воздуха и бактерий. Важной особенностью этих палат является то, что в них поддерживается отрицательное давление, что помогает удерживать загрязняющие вещества в палате и не допускать их распространения за её пределы.

Было проведено множество экспериментальных и численных исследований, чтобы предсказать риск распространения инфекции, а также найти решения для ограничения распространения инфекции воздушно-капельным путем при чихании. В работе [1] в рамках программного обеспечения ANSYS Fluent численно исследовано движение и распределение капель, содержащих коронавирусы, выделяемых при кашле или чихании в воздухе, в модели изолятора в Хошимине, Вьетнамский национальный университет. Воздушный поток в изолированном помещении был смоделирован с помощью трехмерной модели турбулентности и уравнения энергии с использованием метода конечных объемов. Результаты численных расчетов показали, что распределение скоростей, кинетическая энергия турбулентности и динамика потока сильно повлияли на скорость снижения средней концентрации капель в изолированной палате.

В работе [2] проведено исследование методами вычислительной гидродинамики поля потока и определение траектории рассеивания частиц, вычислена оценка риска инфицирования каждого пациента в соответствующей стоматологической клинике, выборе подходящей скорости вентиляции и определении безопасных зон. На первом этапе исследуется влияние различных скоростей вентиляции на рассеивание капель, инфицированных вирусом, и определяется наиболее подходящая скорость вентиляционного потока. Затем были определены

результаты влияния наличия или отсутствия разделительного экрана в стоматологической клинике на распространение капель из дыхательных путей.

В данной работе проведено исследование влияния отрицательного выходного давления в качестве граничного условия для давления на поле средней скорости в трёхмерной модели инфекционной палаты в рамках открытого пакета OpenFOAM[3]. Стационарное течение воздуха внутри палаты моделировалось с помощью решателя buoyantSimpleFoam с учетом эффекта плавучести в приближении Буссинекса.

**Постановка задачи.** Рассматривается процесс вентиляции трёхмерной модели инфекционной палаты Кара-Суйского территориальной больницы длиной 6м, шириной 4м и высотой 2.6м (см. рис. 1).

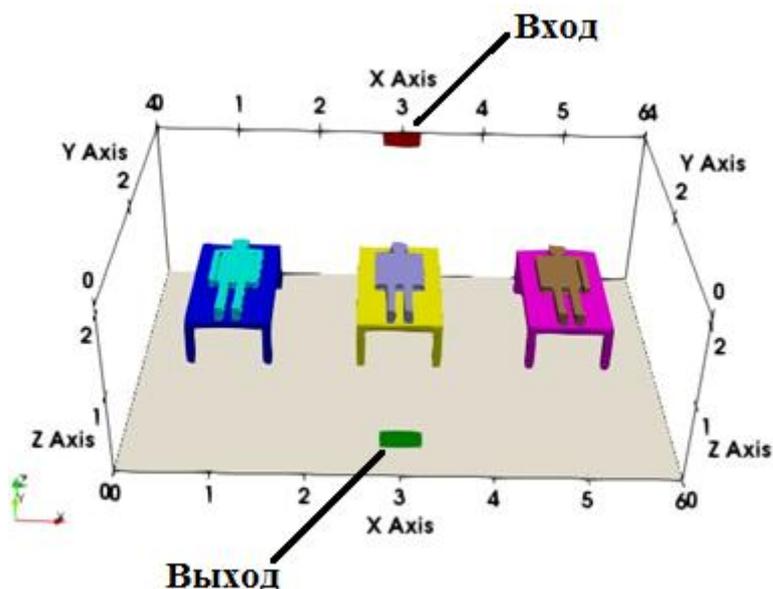


Рис. 1- Модель инфекционной палаты с тремя пациентами

Цель этой задачи заключается в изучении влияния отрицательного выходного давления потока воздуха на поле модуля скорости потока в модели инфекционной палаты.

Начало систем координат расположен в ближнем нижнем углу левой стенки. Ось  $Ox$  направлении слева на право, а ось  $Oy$  направлен от передней стенки в сторону задней стенки. Ось  $Oz$  направлена вертикально вверх. Выходное и входное отверстие представляют собой прямоугольник размерами  $0.8\text{м}\times 0.2\text{м}$ . Геометрический центр входного отверстия расположен на задней стенке в точке с координатами  $(3, 4, 2.2)$ , а центр выходной границы располагался на передней стенке в точке с координатами  $(3, 0, 0.5)$ . Поток атмосферного воздуха с температурой  $295.15\text{К}$  входит в расчетную область с минимальной скоростью, а выходит из нее тоже с минимальной скоростью. Начальная температура потока в палате равна входной температуре, а теплофизические свойства воздуха приведены в табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические характеристики воздуха

Свойство воздуха	Значение
Кинематическая вязкость, $\mu$	$1.825 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$
Плотность воздуха, $\rho$	$1.225 \text{ кг/м}^3$
Теплоемкость при постоянном давлении, $C_p$	$1004.4 \text{ Дж/9кг}\cdot\text{С}$
Коэффициент теплового расширения, $\beta$	$0.0034 \text{ К}^{-1}$
Число Прандтля, $Pr$	$0.7039$

**Математическая модель.** Основу математической модели задачи составляет система трехмерных стационарных уравнений Навье-Стокса, состоящая из следующих уравнений [3, 4]:

Уравнение непрерывности:

$$\nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

Уравнение переноса импульса:

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

Уравнение переноса энтальпии:

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

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

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

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.

Для моделирование влияния турбулентности на среднее течение использовалась стандартная  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности [4, 5]:

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

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

**Численная модель.** Дискретизация расчетной области получена при помощи стандартной утилиты blockMesh открытого пакета OpenFOAMc использование схемы boundedGaussupwind для всех неизвестных переменных. Дискретизация уравнений получена при помощи метода контрольных объемов [3-6]. Исползованные граничные условия, схемы дискретизации и методы решения приведены в табл.2-4.

Таблице 2 – Граничные условия для основных переменных

Граница	u, м/с	p, Па	p_rgh, Па	T, K
Вход	zeroGradient	calculated	totalPressure $P_0 = 4.5 * 10^{-5}$	fixedValue 295.15K
Выход	zeroGradient	calculated	fixedValue 0, -4, -8, -12, -16	zeroGradient
Кровать	noSlip	calculated	fixedFluxPressure	zeroGradient
Пациент	noSlip	calculated	fixedFluxPressure	externalWallHeatFluxTemperature flux 56.52B/ m <sup>2</sup>
Стены, потолок и пол	noSlip	calculated	fixedFluxPressure	zeroGradient

Таблица 3 – Использованные схемы дискретизации

Слагаемое	Схема аппроксимации в пакете OpenFOAM	Порядок точности схемы
Градиент	cellLimitedGausslinear 1	Второй
Дивергенция	bounded Gauss limitedLinear 1;	Второй
Лапласиан	Gauss linear corrected;	Второй
Интерполяция	linear	Первый

Таблица 4 – Методы решение разностных уравнений

Переменная	Решатель	Точность
Давления	метод сопряженных градиентов PCG с использованием предобуслователя DIC	$1e^{-3}$
U, h, k, ε	PBiCGStab с использованием предобуслователяDILU	$1e^{-3}$

**Результаты численных расчетов.** Поток атмосферного воздуха с температурой 295.15K входит через входное отверстие с определенной скоростью и вытекает из модели через выходное отверстие, где задано отрицательное давление. На рисунках 2-3 приведены поле вектора скорости при двух значениях выходного

давления  $P_{out} = 0$  Па (рис.2) и  $P_{out} = -4$  Па (рис. 3). Уменьшение граничного условия для давления от  $P_{out} = 0$  Па до  $P_{out} = -4$  Па приводит к существенному изменению всей картины течения в модели палаты.

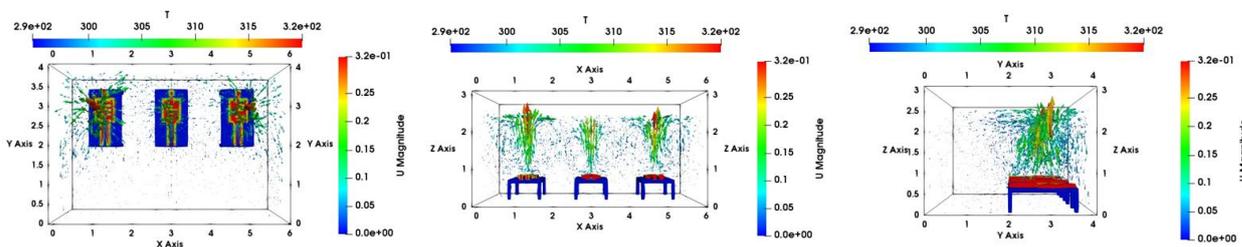


Рис. 2 -Поле вектора скорости при давлении  $P_{out} = 0$  Па в плоскости  $XoY$  (слева),  $XoZ$  (в центре) и  $YoZ$  (справа).

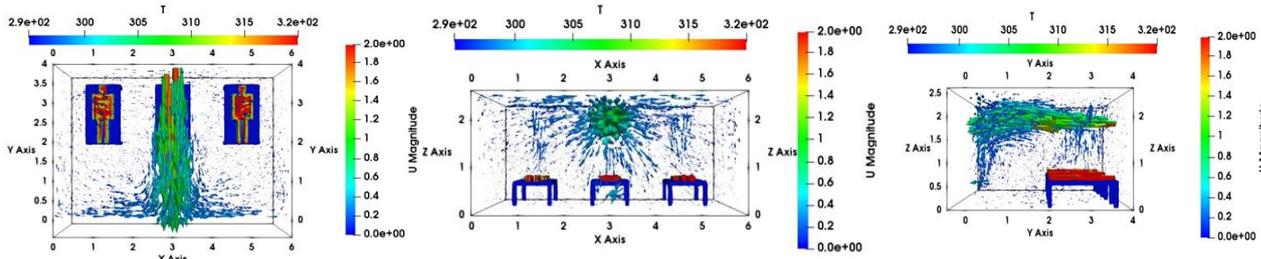


Рис. 3-Поле вектора скорости при давлении  $P_{out} = -4$  Па в плоскости  $XoY$  (слева),  $XoZ$  (в центре) и  $YoZ$  (справа).

**Выводы.** Изолированные палаты используются во многих инфекционных больницах для лечения тяжелобольных пациентов. Важной особенностью этих палат является то, что в них поддерживается отрицательное давление, что помогает удерживать загрязняющие вещества в палате и не допускать их распространения за её пределы.

Математическое моделирование стационарного процесса вентиляции средствами вычислительной гидродинамики проведено в рамках пакета OpenFOAM. Трёхмерная модель инфекционной палаты представляет собой гексаэдр размерами  $4 \times 4 \times 2.6 \text{ м}^3$ , внутри которого находятся три кровати с тремя неподвижными пациентами. Расчетная сетка создана с помощью утилит blockMesh и snappyHexMesh, а дискретизация системы основных уравнений, представляющие законы сохранения массы, импульса и энергии осуществлена при помощи метода контрольных объемов. Проведено исследование влияния

отрицательного выходного граничного условия для давления на гидродинамические характеристики течения воздуха в модели инфекционной палаты. Обнаружено, что Уменьшение граничного условия для давления от  $P_{out}=0$  Па до  $P_{out} = -4$  Па приводит к существенному изменению всей картины течения в модели палаты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Viet. T. Tran, YenH. P. Duong, DucT. Le, TanM. Le. EvaluationofthedistributionofCOVID-19 particlesinan Isolation room to reduce the possibility of transmission via CFD simulation. Science & Technology Development Journal – Engineering and Technology 2023, 7(2):1817-1825
2. ShahramKarami, EsmailLakzian, Goodarz Ahmadi. Prediction of COVID-19 Infection in Dental Clinic by CFD and Wells-Riley Model, Identifying Safe Area and Proper Ventilation Velocity. InternationalJournalofRefrigeration. Volume 151, July 2023, Pages 112-124
3. OpenFOAM v7 User Guide. Available at: <https://cfd.direct/openfoam/userguide-v7>. (accessed 05.08.2023).
4. Ferziger J. H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer Verlag, 2002, 423 p.
5. H. K. Versteeg, W. Malalasekera. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2 ndedition, PearsoneducationLimited, England, 2007, 517p.
6. S. V. Patankar. Numerical heat transfer and fluid flow. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980, 197 p.

УДК 622.1