

УДК 532.517.42

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА В МОДЕЛИ ИНФЕКЦИОННОЙ ПАЛАТЫ

**Курбаналиев А.Ы., Абдимуталипова З. К.**

Ошский государственный университет, г.Ош

В данной работе исследуется влияние различных конфигураций впускных и выпускных отверстий на распределение воздушных потоков в изоляционной комнате с отрицательным давлением. Целью исследования является изучение влияния выходного граничного давления на поле скорости нестационарного воздушного течения в модели инфекционной палаты. Для моделирования использовался метод вычислительной гидродинамики (CFD) с применением пакета OpenFOAM.

**Ключевые слова:** OpenFOAM, помещение вентиляции с отрицательным давлением, распространение загрязняющих веществ.

## ИНФЕКЦИОННОГО ПАЛАТАНЫН МОДЕЛИНДЕ АБАНЫН ТУРУКСУЗ КЫЙМЫЛЫН МОДЕЛДЕШТИРҮҮ

**Курбаналиев А.Ы., Абдимуталипова З. К.**

Ош мамлекеттик университети, Ош ш.

Бул иште кирүүчү жана чыгуучу тешиктердин ар кандай конфигурацияларынын терс басымдагы изоляциялык бөлмөдөгү аба агымынын бөлүштүрүлүшүнө тийгизген таасири изилденет. Изилдөөнүн максаты - инфекциялык палатанын моделинде туруксуз аба агымынын ылдамдык талаасына чыгуучу чектик басымдын таасирин изилдөө. Моделдөө үчүн эсептөөчү гидродинамика (CFD) ыкмасы OpenFOAM пакетин колдонуу менен жүргүзүлдү.

**Баштапкы сөздөр:** OpenFOAM, терс басымдагы желдетилген бөлмө, булгоочу заттардын таралышы.

## MODELING OF TRANSIENT AIR MOVEMENT IN A MODEL OF AN INFECTIOUS WARD

**Kurbanaliev A.Y., Abdimutalipova Z. K.**

Osh State University, Osh c.

This paper investigates the effect of different inlet and outlet configurations on air flow distribution in a negative pressure isolation room. The aim of the study is to investigate the effect of the outlet boundary pressure on the velocity field of non-stationary air flow in a model infectious disease ward. The computational fluid dynamics (CFD) method using the OpenFOAM package was used for modeling.

**Keywords:** OpenFOAM, negative pressure ventilation room, pollutant dispersion.

**Введение.** Изоляционные помещения в больницах играют ключевую роль в предотвращении распространения инфекционных заболеваний, таких как туберкулез, COVID-19 и тяжелый острый респираторный синдром. Эффективная вентиляция является критически важным фактором для защиты медицинского персонала от заражения. Недостаточное или неправильное распределение воздушных потоков может привести к распространению патогенов и увеличению риска инфицирования.

В работе [1] рассматривается влияние различных стратегий вентиляции на распространение аэрозолей в помещениях с отрицательным давлением, подчеркивая важность расположения впускных и выпускных отверстий. Другое исследование [2] анализирует использование CFD для моделирования воздушных потоков в больничных помещениях и показывает, что применение численного моделирования позволяет прогнозировать возможные зоны скопления загрязнителей.

Работа [3] рассматривает эффективность различных типов вентиляции, включая турбулентную и ламинарную подачу воздуха, и их влияние на уровень перекрестного заражения. В исследовании [4] проводится сравнение экспериментальных данных и CFD-симуляций, подтверждающее точность численного моделирования для анализа систем вентиляции. В частности, выявлено, что схемы с вытяжными отверстиями, расположенными в нижней части помещения, способствуют более эффективному удалению загрязненного воздуха. [5] изучали динамическое моделирование воздушного потока в изолированной комнате. Они проанализировали влияние движущегося человека на распределение воздуха в помещении, включая скорость, давление и загрязняющие поля. При моделировании использовалась модель турбулентности  $k-\varepsilon$  и CO<sub>2</sub> в качестве источника загрязнения. [6] обнаружил, что расположение приточного воздуха и вытяжного отверстия являются факторами, которые оказывают наибольшее влияние на рассеивание загрязняющих веществ в палатах с отрицательным давлением.

**Цель** данной работы заключается в изучении влияния выходного граничного давления на поле скорости нестационарного воздушного течения в модели инфекционной палаты.

**Постановка задачи.** Геометрия в модели инфекционной палаты с входными и выходными отверстиями представляет собой трехмерную комнату размером 4×4×2.6 м, где расположены кровать и пациент (см.рис.1а,б). Входное и выходное отверстия имеют форму прямоугольника размерами 0.8 м × 0.2 м, а выходное отверстие расположено на правой стенке. Поток атмосферного воздуха, поступающего в расчётную область, имеет температуру 295.15К. Требуется определить качество нестационарного процесса вентиляции помещения путем сравнения полей модуля скорости и возраста воздуха в двух точках с координатами (-0.5 0.4 0.1) и (1.0 0.4 0.1), находящихся около лиц двух пациентов.

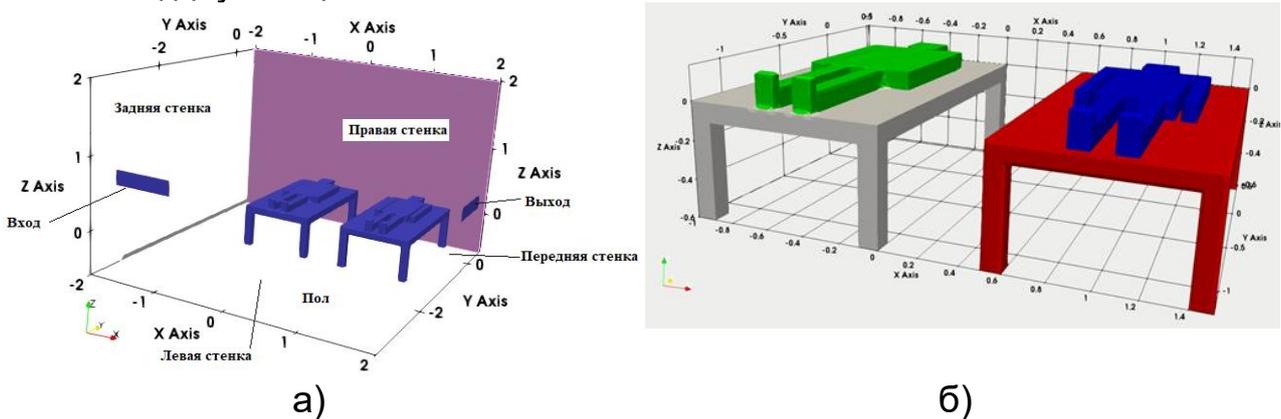


Рис. 1– Геометрия задачи (а) и пациенты с кроватью (б).

**Математическая модель задачи** Математическая модель рассматриваемой задачи основана на осреднённой по Рейнольдсу системе уравнений Навье-Стокса, в которую входят уравнения неразрывности, переноса импульса, энтальпии и уравнения для возраста воздушного потока[7]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

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

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

$$h = \int_{T_0}^T C_p(T) dT ; \mu_{eff} = \mu + \mu_t; \mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon; \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

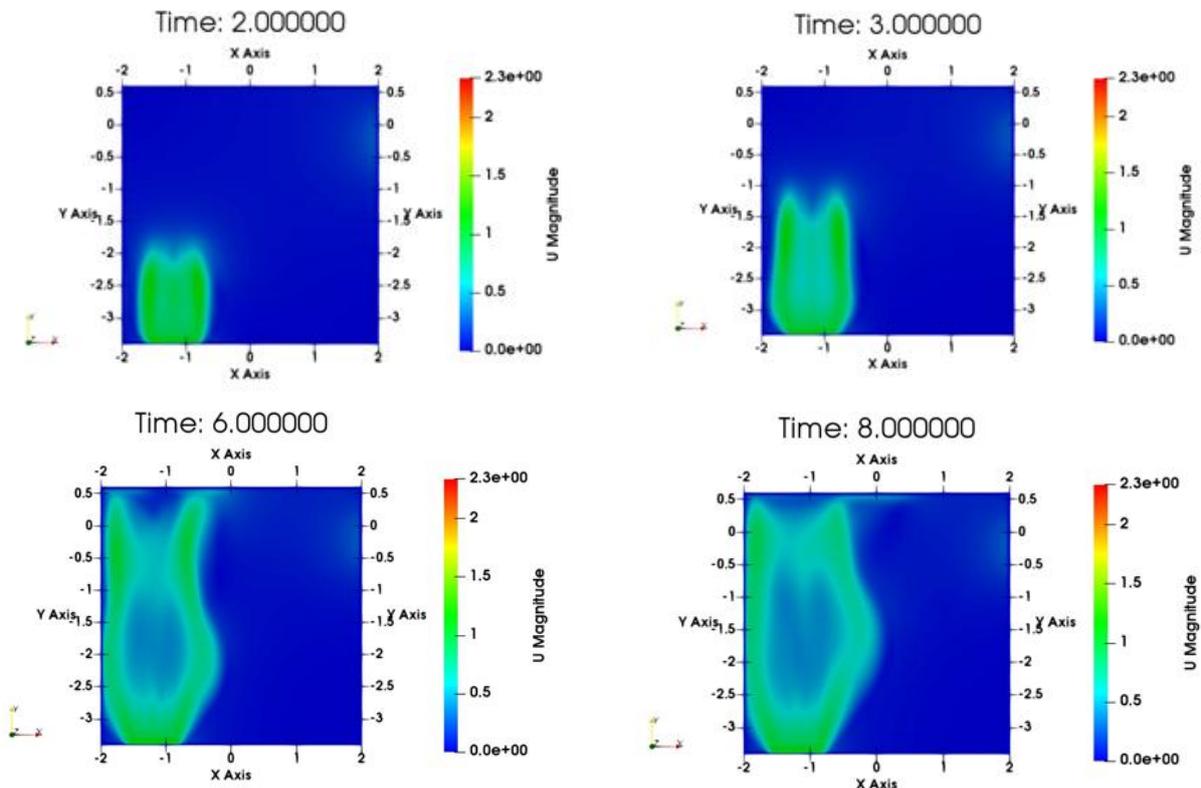
$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tau) + \nabla(\mathbf{u}\tau) - \nabla \cdot \left( \frac{\rho\mu_{eff}}{\sigma_{eff}} \nabla\tau \right) = 1 \quad (7)$$

**Численная модель.** Начальные значения полей модуля скорости и давления заданы равными нулю, температура потока в расчетной области равна 295.15 К, Начальное значение возраста воздуха полагается равным некоторому большому числу, так как в начале вентиляция помещения отсутствовала. Значения давления на входе полагались равным  $4.5 \times 10^{-5}$  Па, а на выходе  $4.5 \times 10^{-5}$  Па, -4Па, -8Па, -12Па и -16Па. Температура на входе 295.15 К, а на выходе, на кровати и на стенках помещения для температуры задано условие адиабатичности - отсутствие переноса тепла через границы. Граничные условия для температуры на поверхности пациента задается аналогично задаче-2, с учетом постоянного равномерного теплового потока мощностью 56.52 Вт/м<sup>2</sup>, выделяемый телом пациента в окружающий воздух помещения. Остальные граничные условия, методы дискретизации и решения СЛАУ аналогичны задаче-4. Для дискретизации нестационарного члена систем уравнений (1-7) использовался метод Эйлера. Для обеспечения устойчивости итерационного процесса число Куранта-Фридрихса и Леви не превышало 1.

**Результаты численных расчетов и обсуждение.** Поле модуля скорости воздушно потока вдоль горизонтальной плоскости  $z=0.7$ м приведены на следующих рисунках. Это плоскость проходит через нижний край входного отверстия. Здесь четко видно разделение нижнего края прямоугольной струи для значения давления на выходной границе в -4 Па(см.рис.2).



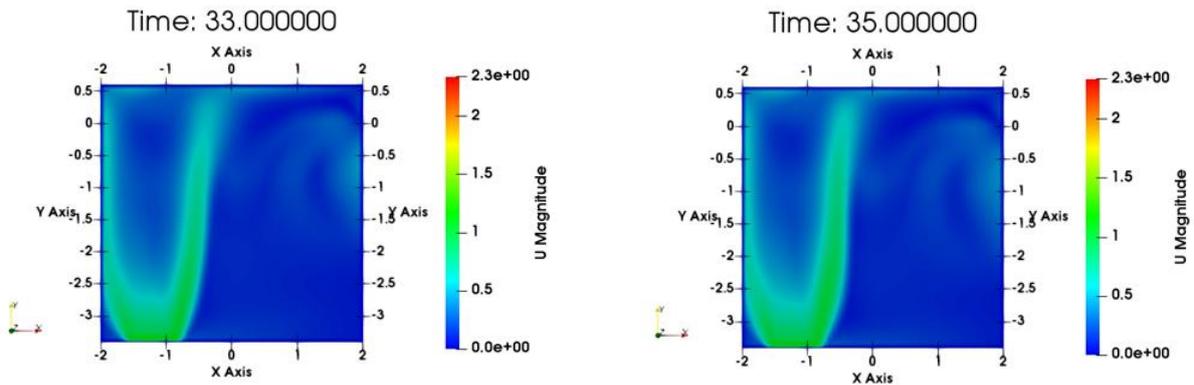
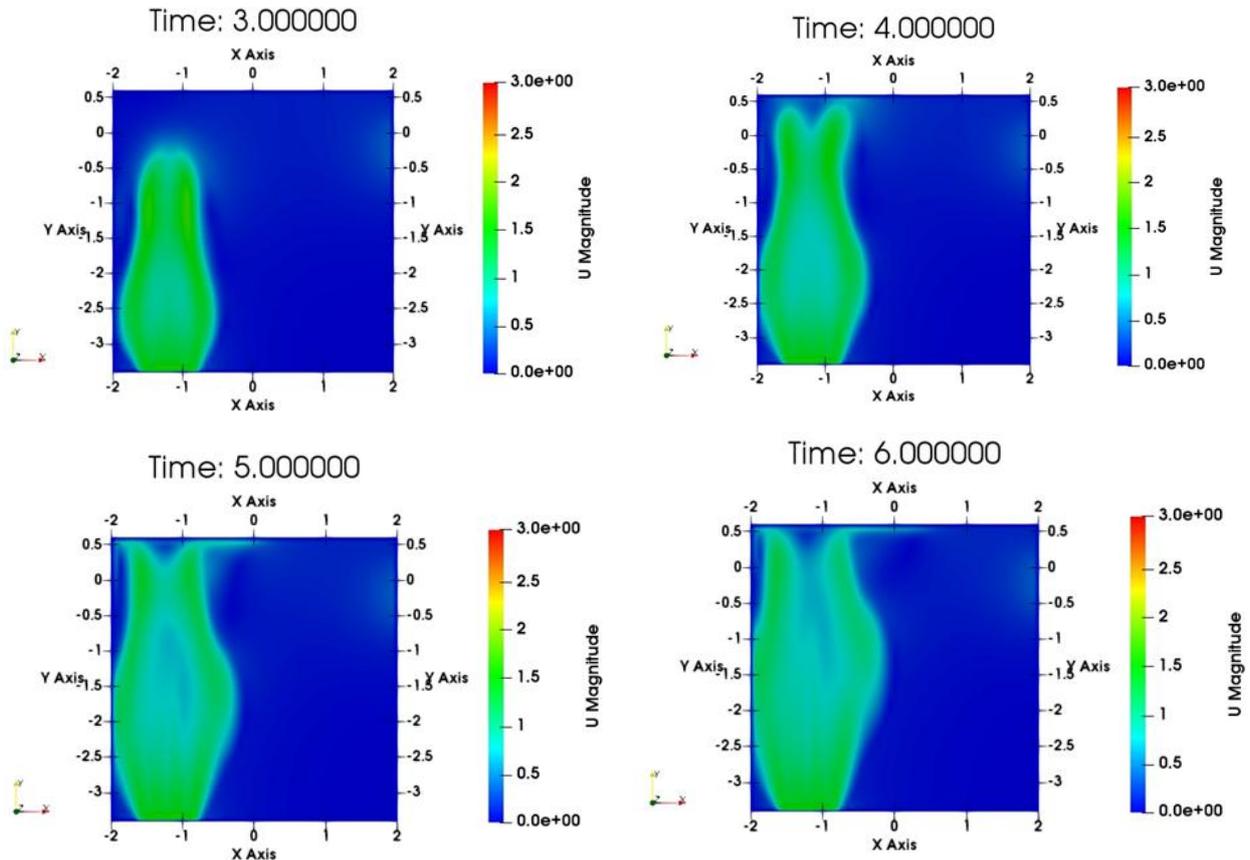


Рис. 2 – Поле модуля скорости на плоскости  $z=0.7\text{м}$  для  $P_{\text{out}} = -4\text{ Па}$ .

За время в 6 с от начала входа в помещение, струя доходит до правой стенки, и нижняя граница струи заметно расширяется в свободную от стенки сторону. Такое же поведение нижнего края прямоугольной струи наблюдается и для моментов времени от 30 с до 35с. Такое поведение нижнего края струи наблюдается и для моментов времени от 3 с до 5 с, в течении которого струя достигнув правую стенку отражается от нее (момент времени 6с), что отчетливо видно на следующем рисунке 3.



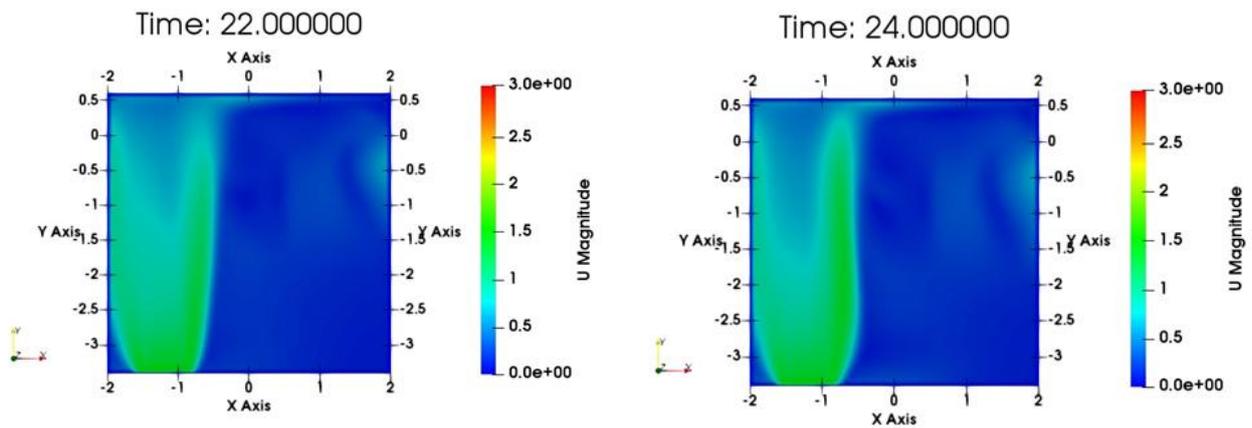


Рис. 3– Поле модуля скорости на плоскости  $z=0.7\text{м}$  для  $P_{\text{out}}= - 8 \text{ Па}$ .

Разделение переднего фронта нижнего края струи еще наблюдается для моментов времени от 22с до 30 с, что имеет место чуть раньше, чем для случая, когда выходное давление было равно -4 Па.

Для случая, когда выходное давление равно -12Па, картина течения совсем друга – здесь отсутствует разделение переднего фронта нижнего края струи. Из-за относительно большой скорости струи, ее форма остается почти симметричной, что отчетливо показывает рис.4.

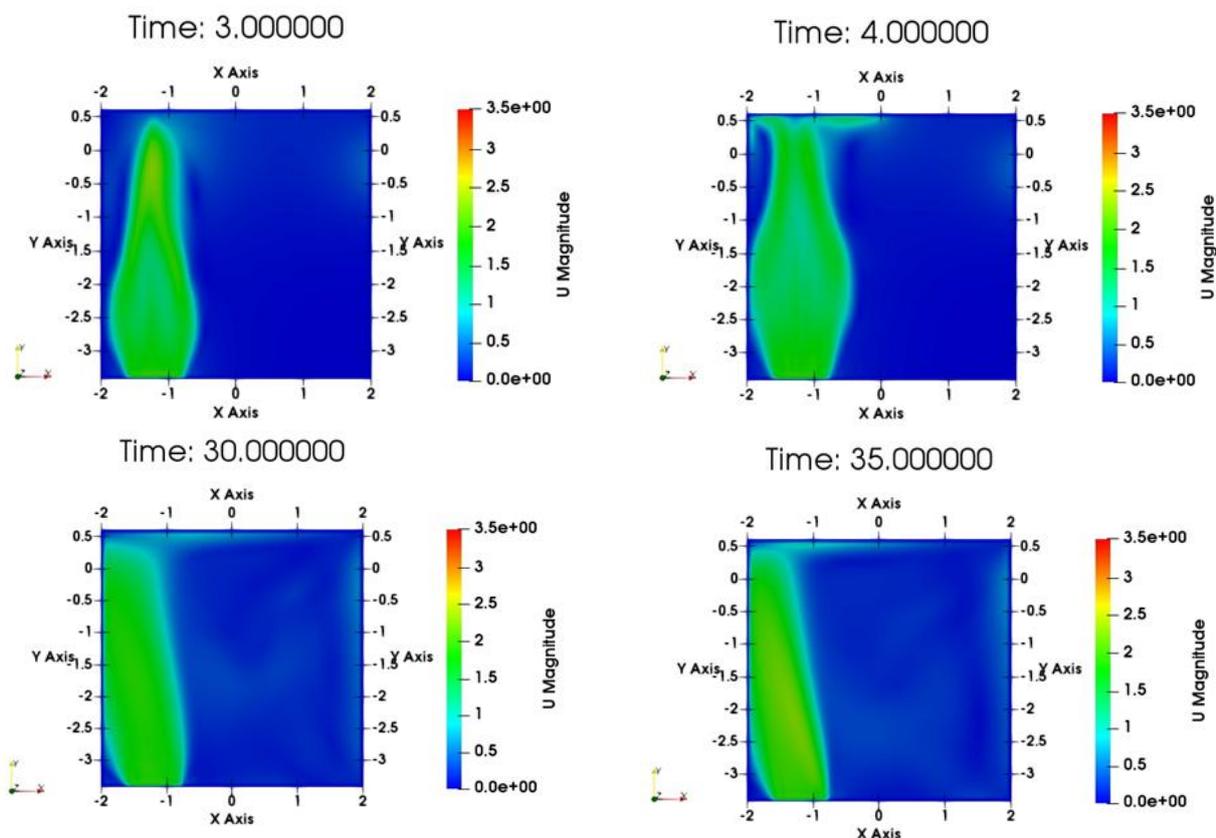


Рис. 4 – Поле модуля скорости на плоскости  $z=0.7\text{м}$  и для  $P_{\text{out}}= - 12 \text{ Па}$ .

Передний фронт струи достигает правой стенки примерно за три с лишним секунд, а в момент времени 4с струя начинает терять свою симметрию. Здесь, начиная от момента времени 21с до момента

времени 35с наблюдается смещение потока в сторону задней стенки, что является образованием большого вихревого течения права от струи (со стороны передней стенки). Такое же поведение имеет место и для случая  $P_{out}=-16\text{Па}$ .

На следующих рисунках (см.рис.5) отчетливо видны зоны рециркуляции, интенсивность которой растет с увеличением модуля отрицательного выходного граничного условия для давления, которая приводит к отклонению потока в сторону задней стенки помещения.

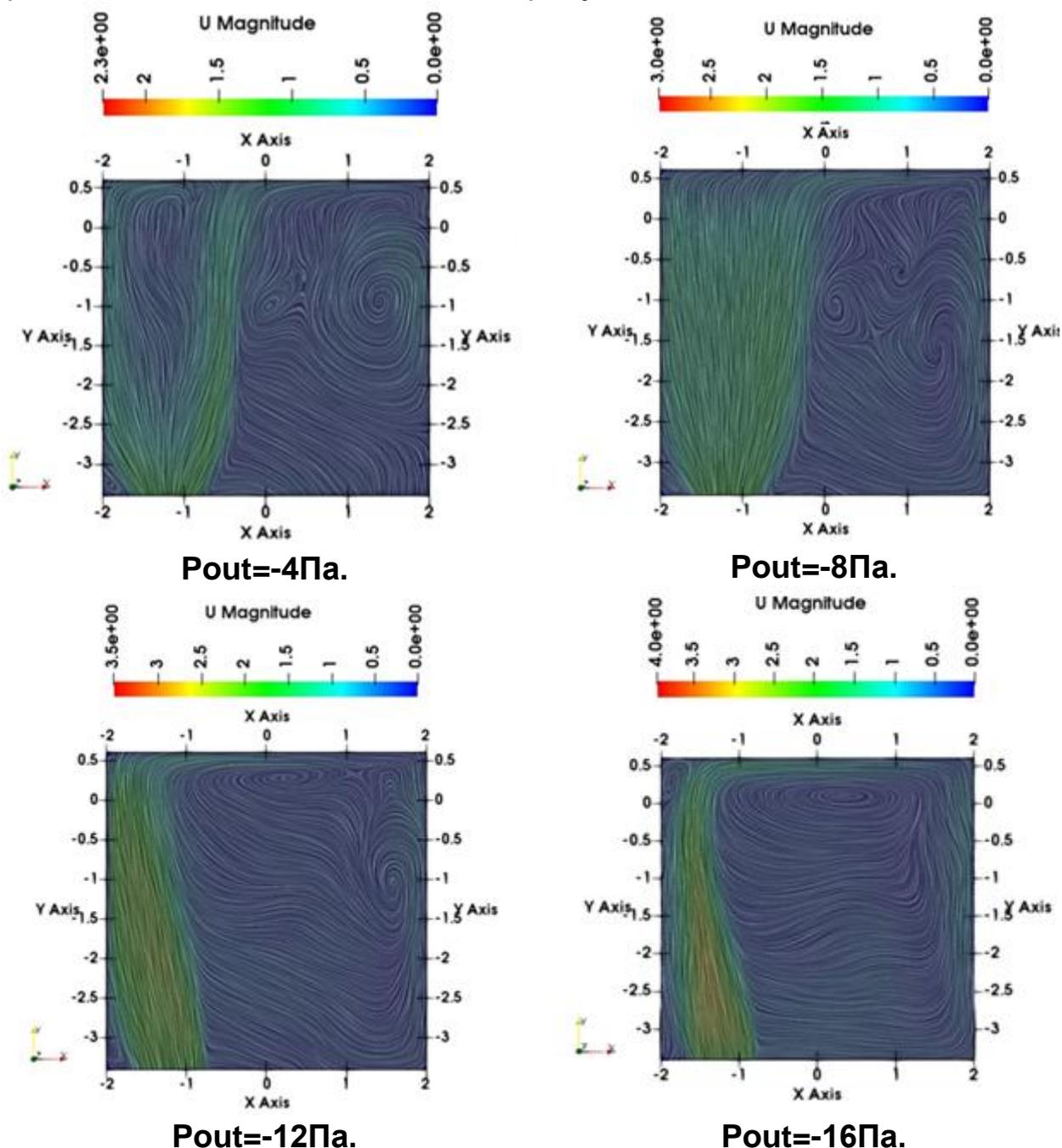
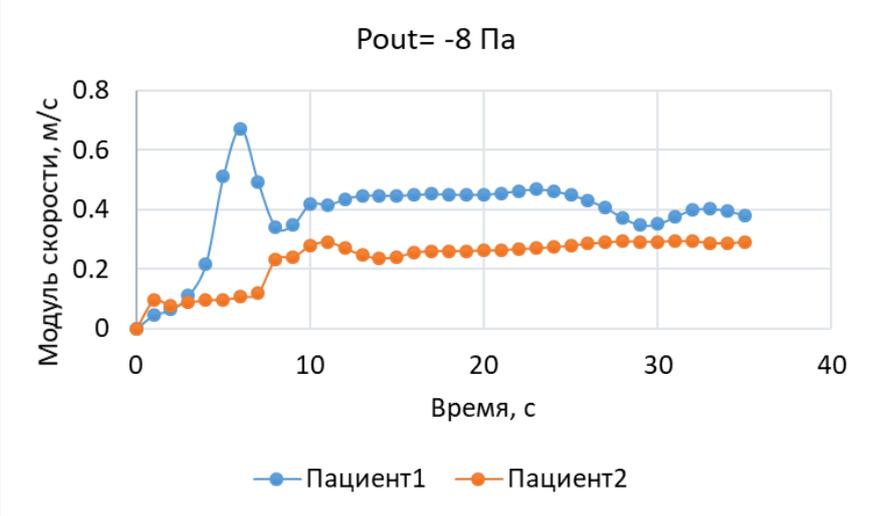
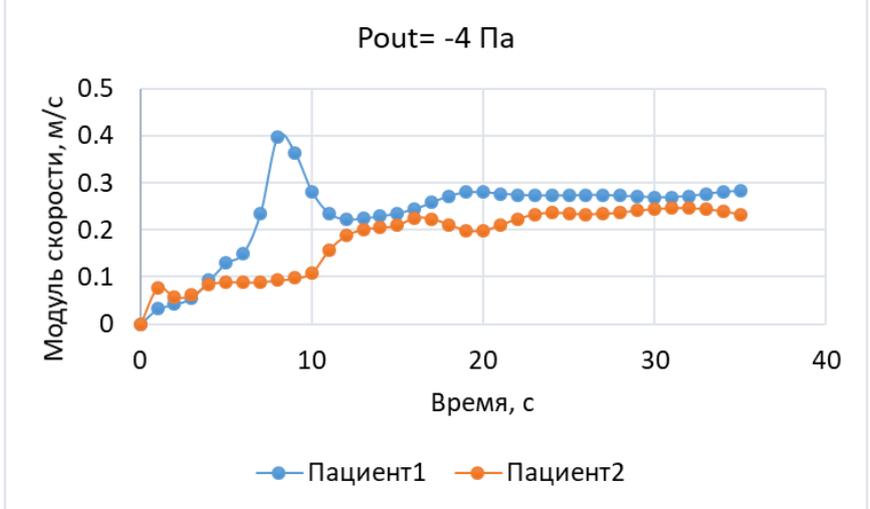
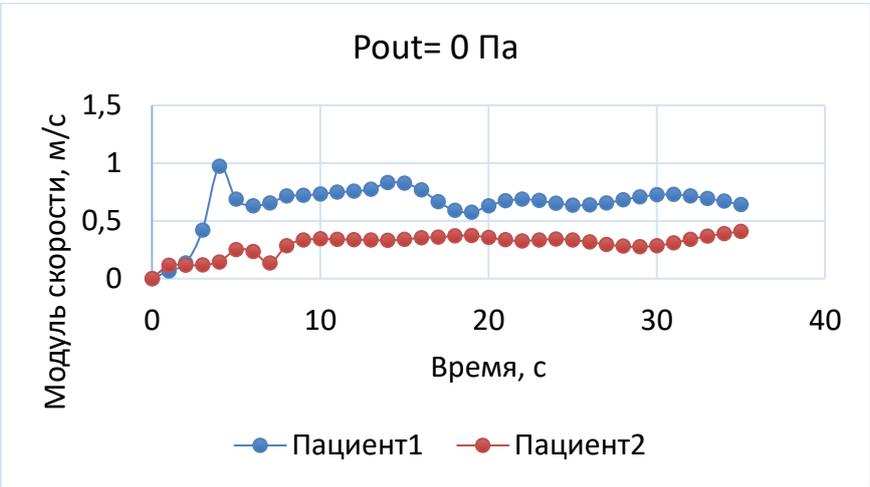


Рис. 5- Изолинии модуля скорости на плоскости  $z=0.7\text{м}$  при разных отрицательных давлениях

Численные результаты по модулям скорости и возраста воздуха в точках около лиц двух пациентов представлены на следующих рисунках 6 и 7 соответственно.



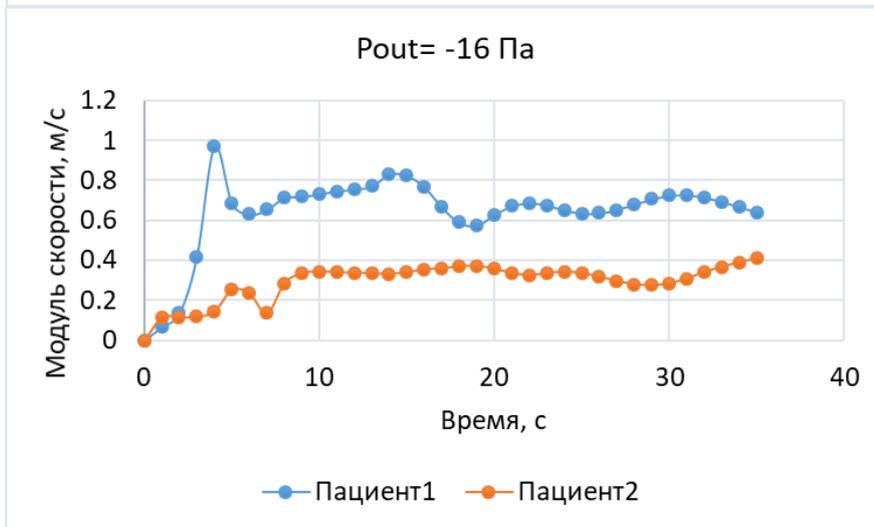
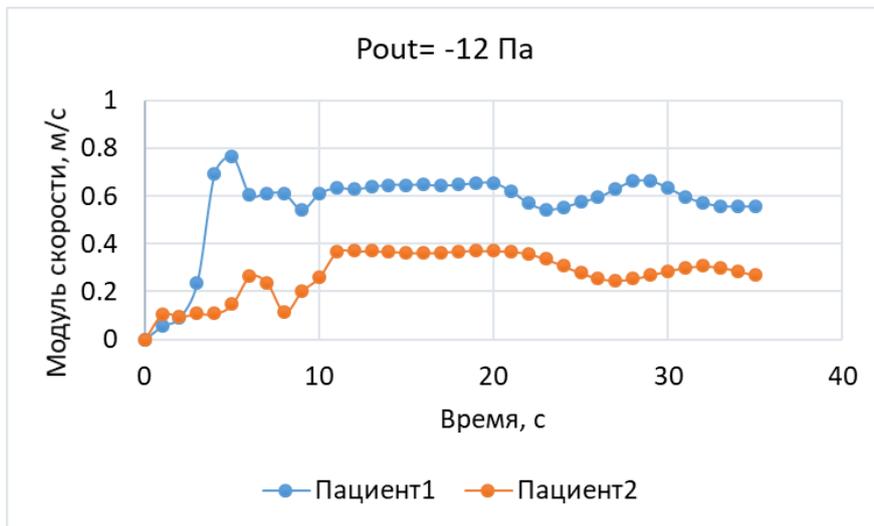
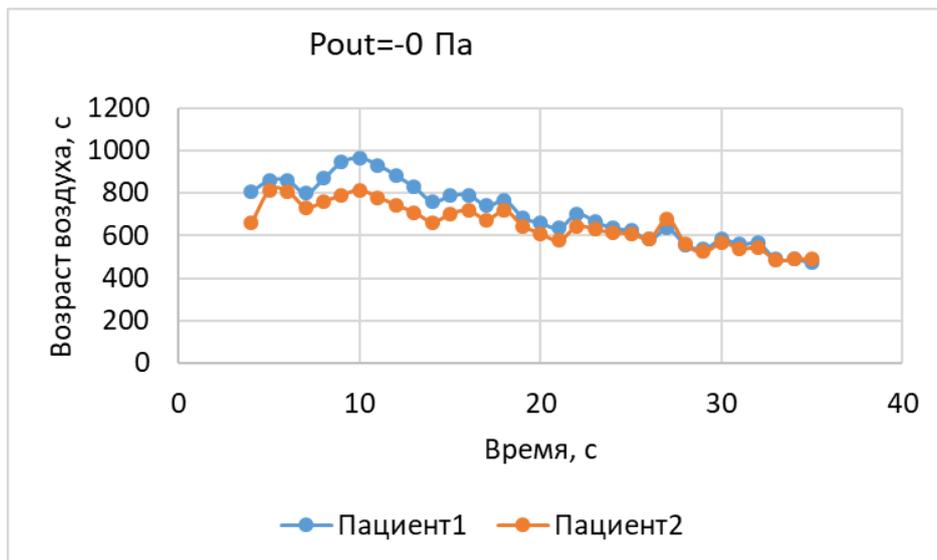
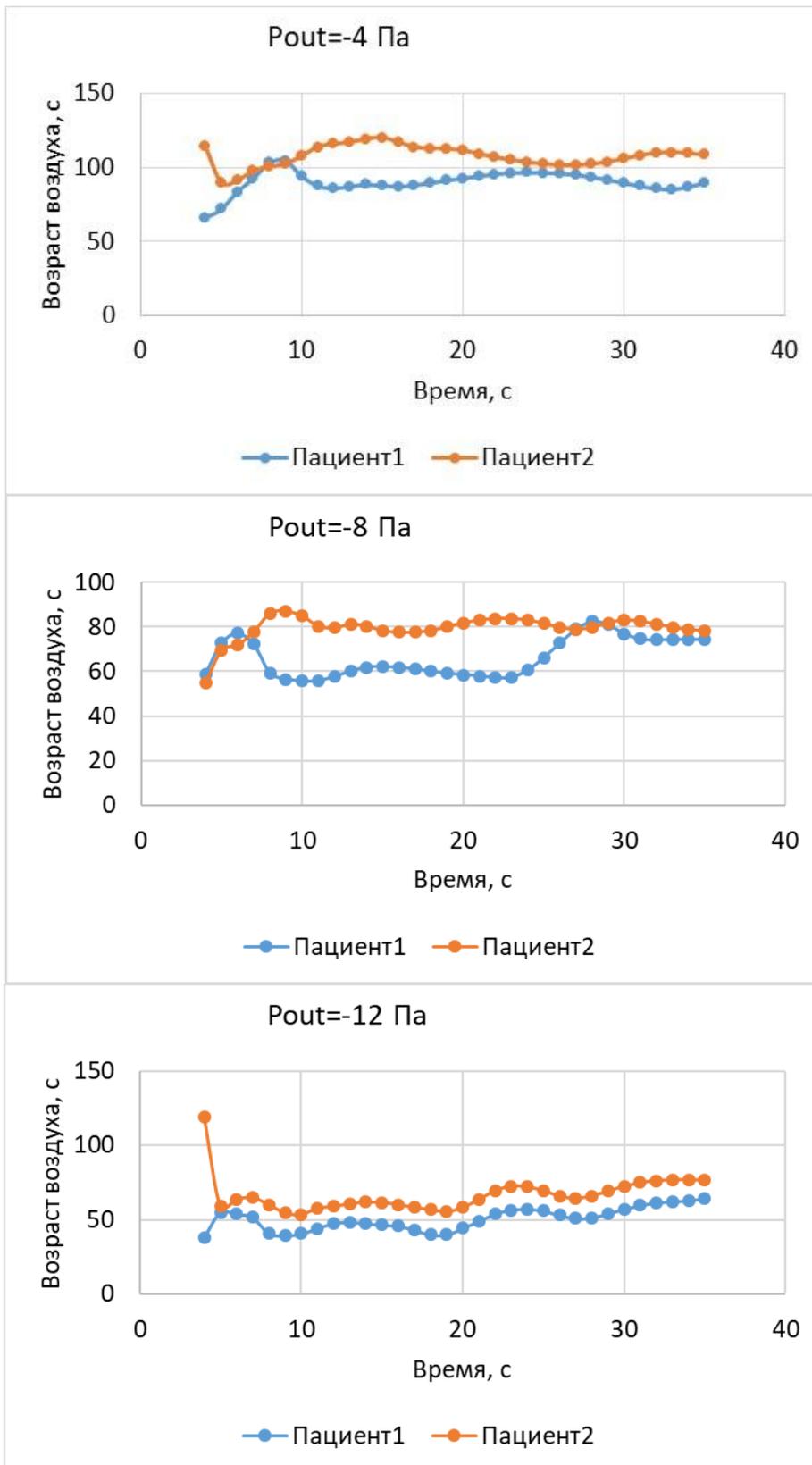


Рис. 6 - График зависимости модуля скорости воздуха от времени





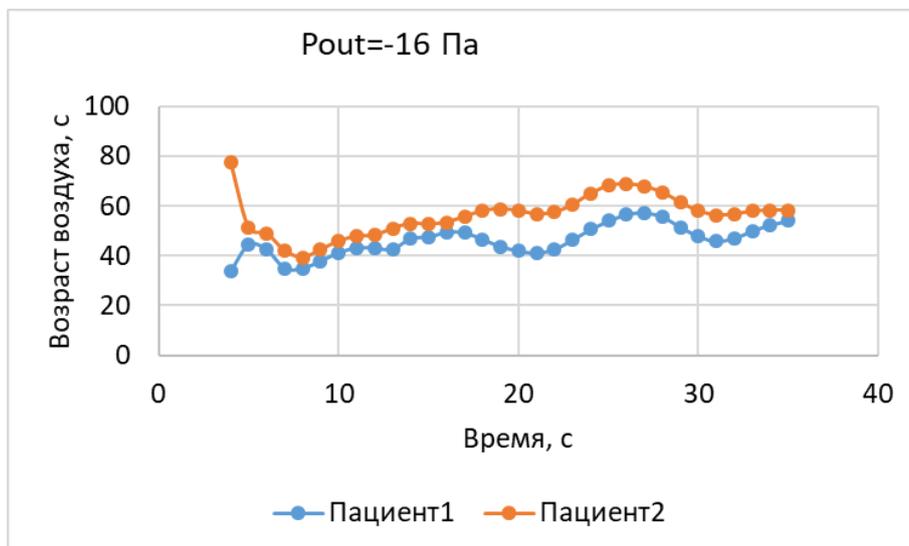


Рис. 7- График зависимости возраста воздуха от времени

Сравнение этих рисунков показывает, что в случае естественной конвекции, когда  $P_{out}=0$  Па, условия комфортности по скорости воздуха для обоих пациентов практически одинаковые, кроме моментов времени примерно от 4с до 18с. После времени от 20с модуль скорости в точке около лиц двух пациентов равно примерно 0.07м/с и согласно требованиям международного стандарта по эргономике помещений скоростной режим является комфортным, отсутствует ощущение сквозняка. С ростом абсолютного значения отрицательного выходного давления разница в значениях скоростей увеличивается, причем скорости воздуха у второго пациента меньше чем у первого и он находится более выгодном положении – ощущение сквозняка у него меньше.

Результаты численных расчетов значений возраста воздуха в секундах и модуля скорости около лицевой части двух пациентов при разных выходных давлениях для момента времени 35с приведены в следующей табл. 1. Как видно из этой таблицы, увеличение абсолютного значения выходного отрицательного давления приводит к уменьшению возраста воздуха, что благоприятно влияет на улучшение процесса вентиляции в помещении при использованной схеме. Однако, это в свою очередь приводит к росту модулю скорости больше, чем 0.2 м/с, что вызывает появление ощущения сквозняка у пациентов (согласно международному стандарту по эргономике помещений).

Таблица 1- Сравнение возраста и модуля скорости при разных давлениях.

Давление, Па	Пациент 1		Пациент 2	
	Возраст воздуха, с	Модуль скорости, м/с	Возраст воздуха, с	Модуль скорости, м/с
0	473.3110	0.0719	493.4690	0.0712
-4	89.7817	0.2834	108.309	0.2331
-8	74.4209	0.3802	78.3139	0.2910

-12	64.1823	0.5569	76.5528	0.3683
-16	54.0439	0.6411	58.3630	0.4089

**Заключение.** Таким образом численно исследовано влияние выходного отрицательного давления на два взаимоисключающих параметра течения– скорости потока и возраста воздуха в помещении. Обнаружено, что увеличение абсолютного значения отрицательного давления на выходе в качестве граничного условия приводит к улучшению проветривания помещения. Однако, это в свою очередь приводит к росту модулю скорости больше, чем 0.2 м/с, что вызывает появление ощущения сквозняка у пациентов

### ЛИТЕРАТУРА

1. Foster, A. M., Swain, C. J., & Barrett, S. E. (2006). CFD modelling of airborne pathogen transport. *Journal of biomechanics*, 39(16), 2999-3006.
2. Li, Y., Leung, G. M., Tang, J. W., Yang, X., & Chao, C. Y. (2007). Role of ventilation in controlling SARS transmission: a well-mixed room approach. *Indoor air*, 17(1), 2-14.
3. Memarzadeh, F., & Manning, A. (2002). Comparison of the ASHRAE Standard 62-1989 and the 1996 CDC guidelines for airborne isolation room design. *HVAC&R research*, 8(4), 329-346.
4. Qian, H., Li, Y., Nielsen, P. V., & Huang, X. (2006). Dispersion of exhaled droplet nuclei in a two-bed hospital ward with three different ventilation systems. *Building and environment*, 41(3), 299-306.
5. Shih, Y.C., Chiu, C.C., and Wang, O., 2007. Dynamic air flow simulation within an isolation room. *Building and Environment*, 42,3194-3209.
6. Cho J., Investigation on the contaminant distribution with improved ventilation system in hospital isolation rooms: effect of supply and exhaust air diffuser configurations, *Applied Thermal Engineering*. (2019) 148, 208–218, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.023>, 2-s2.0-85056853019.
7. Ferziger J. H., Peric M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer Verlag, 2002. – 423p.
8. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с. англ. / С.В.Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.