

## Численное моделирование истечения из современных воздухораспределительных устройств

*Д.М. Денисихина, Ю. В. Иванова, В.В. Мокров*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный  
университет*

**Аннотация:** Методы численного моделирования получают все большее распространение при решении задач воздухораспределения и воздухообмена. При этом одним из вопросов правомерности использования данных подходов является возможность достоверного описания течения из современных воздухораспределительных устройств. В работе были проведены физический и численный эксперименты истечения из диффузора SMK 200. В ходе физического эксперимента регистрировались поперечные профили струи на различных расстояниях от плоскости истечения. Инструментом численного исследования являлся вычислительный комплекс STAR-CCM+. Численное моделирование было проведено с использованием различных моделей турбулентности. Результаты показали, что использование моделей турбулентности семейства k- $\epsilon$  позволяют с достаточной для практики точностью описывать параметры течения, формируемого современным воздухораспределительным устройством.

**Ключевые слова:** воздухораспределение, численное моделирование, модели турбулентности, физический эксперимент, воздухораспределитель, STAR-CCM+.

### Введение

Расчет воздухообмена и воздухораспределения в помещениях является одним из основных этапов при проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Существующие инженерные подходы к расчету воздухообмена и воздухораспределения [1], разработанные для наиболее распространенных типов вентиляционных струй, дают достоверные результаты для задач с преобладанием либо вынужденных, либо свободно-конвективных течений. В тоже время, для современных объектов, в т.ч. большеобъемных помещений, где циркуляция воздуха в объеме определяется как приточными струями, так и интенсивными свободно-конвективными течениями [2], инженерные методы расчета могут давать неверные результаты. В таких случаях требуется уточняющие расчеты воздухораспределения с использованием современных методов численного моделирования. Данные методы базируются на численном решении

---

дифференциальных уравнений сохранения и позволяют рассчитать распределение параметров воздушной среды (трехмерные поля температуры, скорости, влажности) по всему объему помещения.

Методы численного моделирования – перспективное направление, приобретающее все большую популярность при решении задач тепломассообмена [3-5], в т.ч. задач рациональной организации воздухораспределения в помещениях [6-11].

Картина циркуляции воздушных потоков в помещении будет определяться, в том числе, типом используемых для формирования приточных струй воздухораспределительных устройств. Поэтому, для правомерного использования методов численного моделирования для расчета воздухораспределения необходимо убедиться в достоверности моделирования потоков, формируемых современными воздухораспределительными устройствами.

### **Цель исследования**

Целью настоящего исследования является проведение численного моделирования истечения из современного воздухораспределительного устройства при использовании различных моделей турбулентности, сравнение результатов расчетов с данными физического эксперимента, анализ возможности корректного описания истечения из воздухораспределителя на расчетных сетках, пригодных для использования в практических задачах расчета воздухораспределения в помещении.

### **Метод исследования**

Инструментом численного исследования в настоящей работе является гидродинамический вычислительный комплекс STAR-CCM+, основанный на численном решении трехмерных дифференциальных уравнений сохранения.

Для описания распространения вентиляционной струи использовались уравнения сохранения (1)-(4).

Уравнение сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

уравнение сохранение импульса

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau} + \bar{\tau}_t) + \rho \vec{g}, \quad (2)$$

где тензор вязких напряжений  $\bar{\tau}$ , определен с помощью реологического закона Ньютона

$$\bar{\tau} = \mu(\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} \bar{I}, \quad (3)$$

а тензор турбулентных напряжений  $\bar{\tau}_t$  для линейных моделей – в соответствии с обобщенной гипотезой Буссинеска.

$$\bar{\tau}_t = \mu_t(\nabla \vec{V} + [\nabla \vec{V}]^T) - \frac{2}{3} \mu_t \nabla \cdot \vec{V} \bar{I} - \frac{2}{3} \rho k \bar{I}, \quad (4)$$

Для нахождения характеристик турбулентности необходимо использование той или иной модели турбулентности. В работе использовались три различных полуэмпирических модели турбулентности: стандартная  $k$ - $\epsilon$  [12], нелинейная  $k$ - $\epsilon$ , использующая, в отличие от линейных моделей, квадратичную связь между тензором турбулентных напряжений и тензором скоростей деформации [13], модель Ментера SST [14].

### Физический эксперимент

Натурные испытания воздухораспределителя проводились на аэродинамическом стенде научно-исследовательской лаборатории аэродинамики и акустики завода «Арктос». Размеры измерительного помещения 20 м × 12 м × 10 м. Измерения давления и расчет расхода воздуха производились согласно ГОСТ 12.3.018-79. Замеры скоростных полей в поперечных сечениях струи выполнялись согласно ГОСТ Р ЕН 12238-2013.

Все измерения производились с помощью средства измерения (Таблица 1), поверенном в установленном порядке.

Таблица № 1

Средство измерений аэродинамического стенда

Наименование СИ	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Погрешность
Термоанемометрическая система в комплекте с приемником (10шт.)	скорость воздуха	от 0,05 до 10 м/с	в диапазоне 0,05÷10 м/с: 0,02 м/с ± 3% от показаний

Термоанемометрические датчики – сферические, частота съема скорости воздуха - 8Гц. Данные передавались на компьютер и обрабатывались в специальном программном обеспечении. Для последующего анализа и сравнения с данными численного моделирования использовались усредненные за 60с значения.

### Постановка задачи

Для проведения исследования был выбран многоконусный сопловой воздухораспределитель SMK (Арктос), предназначенный для применения в системах вентиляции и кондиционирования помещений общественного и производственного назначения больших объемов (концертные, спортивные, выставочные залы и пр.).

Сопловой воздухораспределитель SMK представляют собой корпус, внутри которого расположена центральная вставка в виде цилиндров с коническим раструбом. В работе исследовался вариант положения центральной вставки, обеспечивающий коническую струю (конический раструб направлен наружу от воздухораспределителя).

В физическом и численном экспериментах расход воздуха составлял 792 м<sup>3</sup>/ч.

Внешний вид воздухораспределителя SMK 200 и 3-D модель, построенная для проведения численных расчетов, представлены на рис. 1.



Рис. 1. – Внешний вид воздухораспределителя SMK 200 (слева) и 3-D модель для численного моделирования (справа)

Для проведения расчетов была построена конечнообъемная неструктурированная расчетная сетка с измельчением внутри воздухораспределителя, в зоне распространения струи. Для возможности использования разработанной математической модели в практических задачах расчета воздухораспределения, размерность расчетной сетки составляла 4,2 млн. ячеек. Для проверки сеточной сходимости (достаточности базовой расчетной сетки для описания истечения из воздухораспределителя) была построена расчетная сетка размерностью 53,6 млн. ячеек с измельчением ячеек в 2 раза по всем направлениям (рис.2).

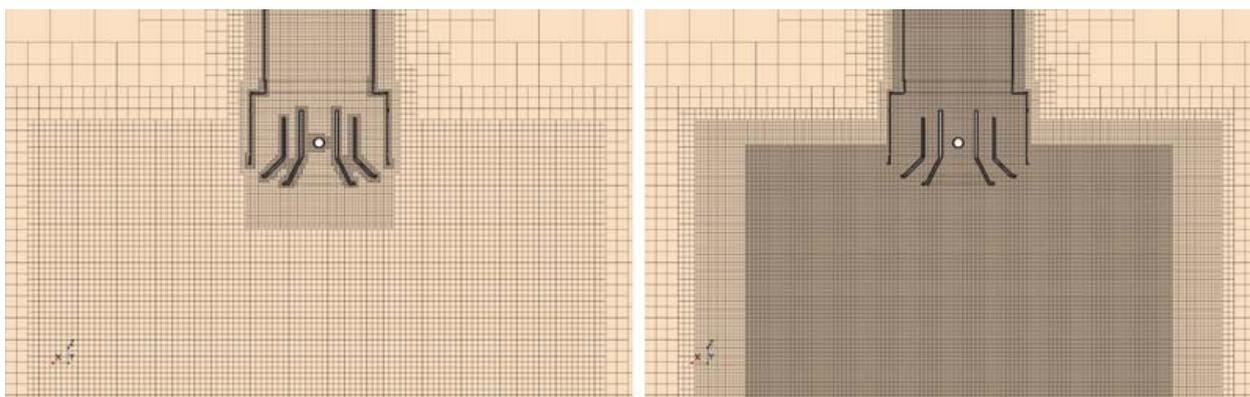


Рис. 2. – Фрагменты расчетной сетки. Размерность сетки 4,2 млн. ячеек (слева), размерность сетки 53,6 млн. ячеек (справа)

Моделирование было проведено с использованием различных полуэмпирических моделей турбулентности (таблица №2).

Таблица № 2

#### Матрица расчетов

№ расчёта	Модель турбулентности	Размер расчетной сетки, ячеек, тыс. ячеек
1	Стандартная $k-\varepsilon$	4 186
2	Стандартная $k-\varepsilon$	53 608
3	Нелинейная $k-\varepsilon$	4 186
4	Ментера SST	4 186

#### Результаты и обсуждения

Проведенное исследование показало (рис. 3), что результаты расчета на измельченной сетке хорошо согласуются с результатами, полученными на базовой сетке. Поэтому все последующие расчеты были проведены с использованием базовой расчетной сетки размерностью 4,2 млн.

На рис. 4 показано поле модуля скорости в поперечных сечениях, проходящих через центр воздухораспределителя. Как видно, течение имеет несимметричный характер вблизи плоскости истечения, что связано с наличием внутри воздухораспределителя поперечной планки (рис. 1). На удалении от плоскости истечения струя становится осесимметричной.

На рис. 5, рис. 6 показано сравнение распределения скорости в поперечных сечениях струи при использовании различных моделей турбулентности с данными физического эксперимента. Из рисунков видно, что наиболее близки к экспериментальным данным оказываются результаты, полученные с помощью моделей турбулентности семейства  $k$ - $\epsilon$ . Модель Ментера SST дает локальное завышение максимальной скорости (менее заполненный профиль струи) вблизи выхода из воздухораспределителя, а начиная с расстояния 2,5 м от плоскости истечения ( $\approx 12$  калибров) результаты с использованием модели Ментера SST становятся близки к моделям турбулентности  $k$ - $\epsilon$ .

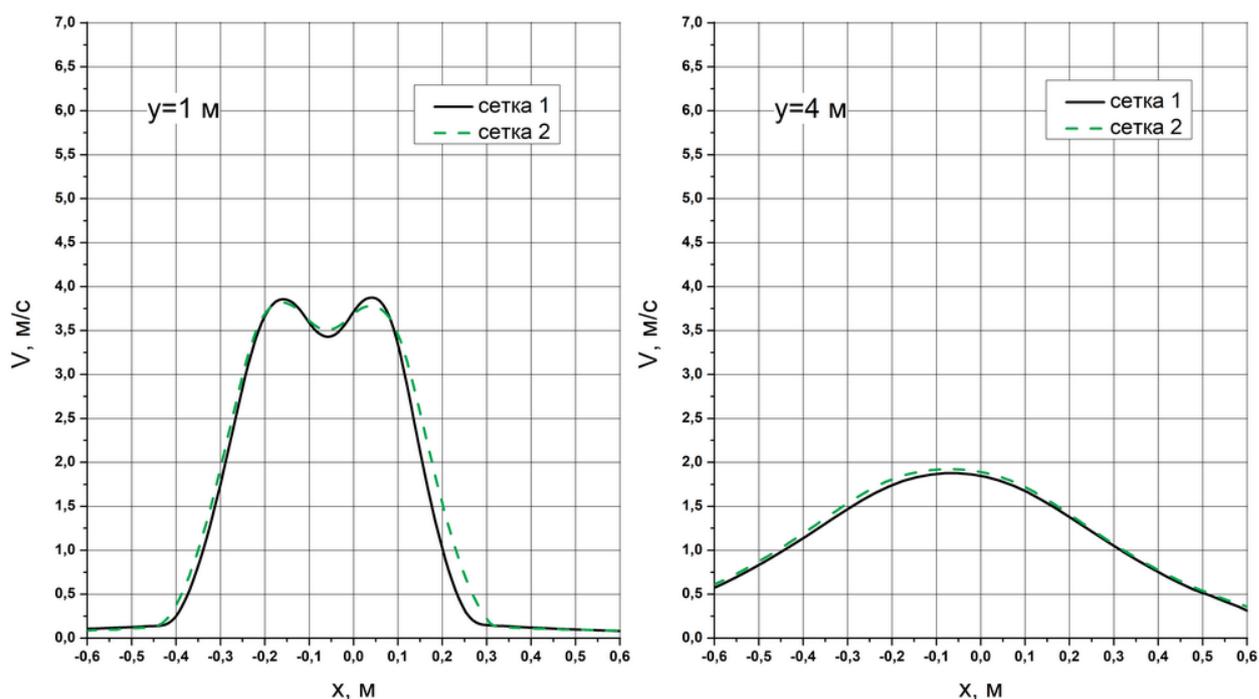


Рис. 3. – Профиль модуля скорости в поперечных сечениях при использовании различных расчетных сеток: 4,2 млн. ячеек (сетка 1) и 53,6 млн. ячеек (сетка 2).

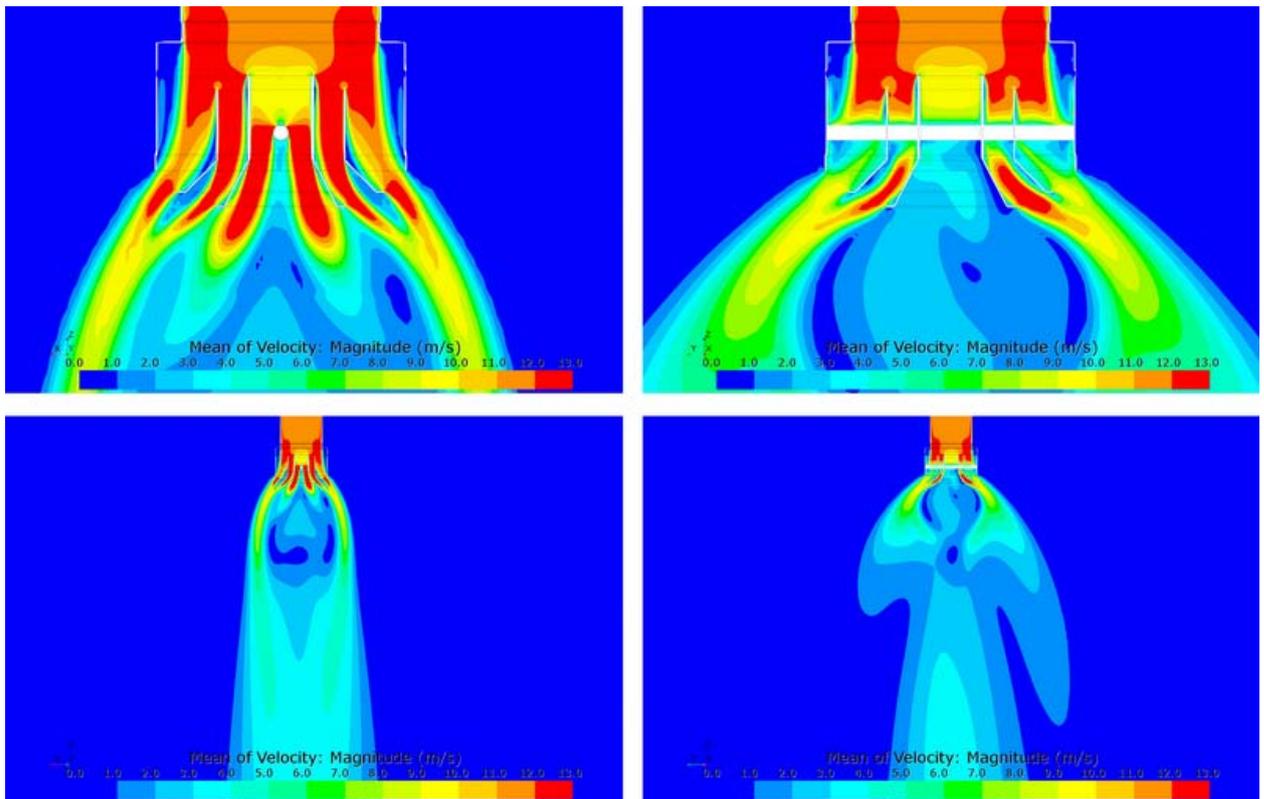


Рис. 4. – Поле модуля скорости в двух взаимоперпендикулярных сечениях, проходящих через центр воздухораспределителя. Стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности

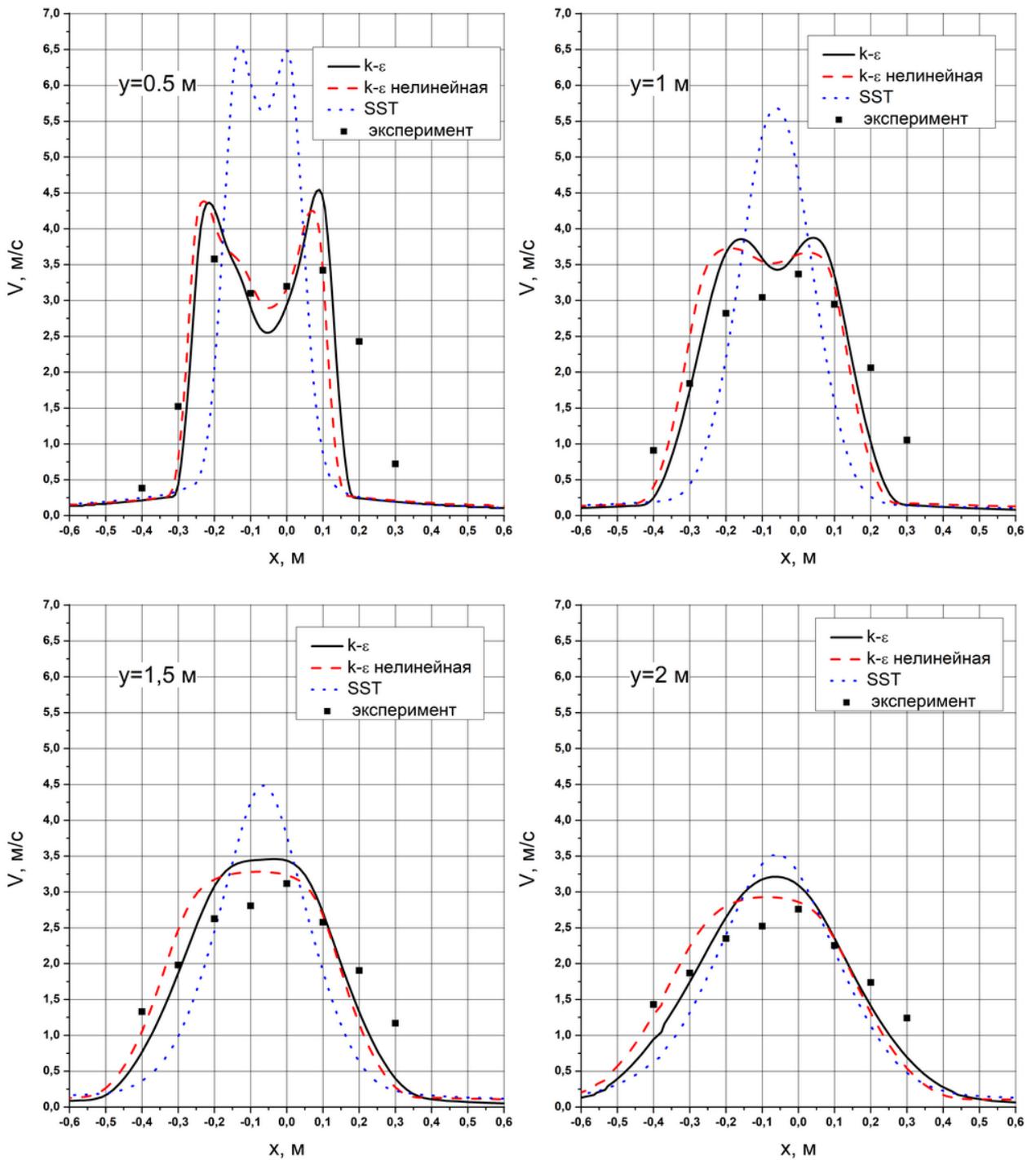


Рис. 5. – Профиль модуля скорости в поперечных сечениях при использовании различных моделей турбулентности и по данным физического эксперимента

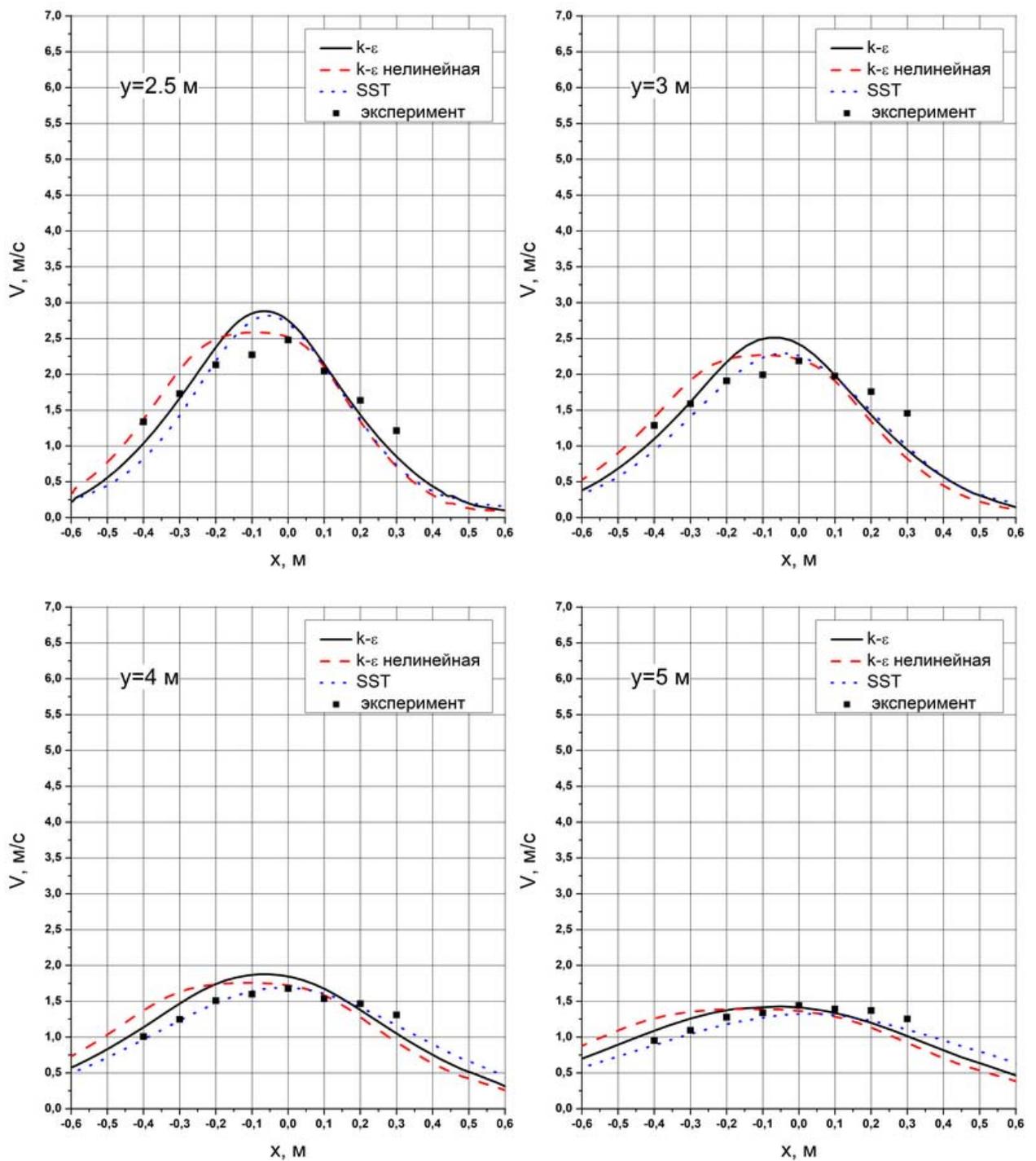


Рис. 6. – Профиль модуля скорости в поперечных сечениях при использовании различных моделей турбулентности и по данным физического эксперимента

## Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что семейство  $k$ - $\epsilon$  моделей турбулентности позволяют с достаточной для практики точностью описывать истечение из современных воздухораспределительных устройств. При этом показано, что использование пригодных для практического применения расчетных сеток позволяет описывать истечение из воздухораспределителя без искажения получаемого решения. Подход численного моделирования течений может быть использован для уточнения воздухораспределения в тех случаях, когда стандартные инженерные подходы не работают.

## Литература

1. Позин Г.М. Научные основы расчета воздухообмена и воздухораспределения с помощью компьютеров // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2006. №4. С. 106-109.
2. Денисихина Д. М. Исследование различных схем воздухораспределения ледовых арен // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. №5. С. 38-48.
3. Иванов В.В., Карасева Л.В., Тихомиров С.А., Пономаренко А.С. Теплообмен в пограничных слоях на излучающих поверхностях // Инженерный вестник Дона, 2017, №2 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4188](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4188).
4. Палий А.В., Шевченко К.В. Численное исследование теплоотвода с изменением агрегатного состояния рабочего вещества // Инженерный вестник Дона, 2018, №1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4648](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4648).
5. Зиганшин А.М., Гимадиева Г.А., Батрова К.Э. Потери давления и характеристики струи, выходящей через среднее боковое отверстие // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. №4. С. 257-265.



6. Nielsen, P.V., Allard, F., Awbi, H.B., Davidson, L. and Schälin, A. // Computational fluid dynamics in ventilation design. REHVA Guide Book 10. RHEVA. 2007. pp. 34–48.

7. Li, Y., Nielsen, P.V. CFD and Ventilation Research // Indoor Air. 2011. Vol. 21(6). pp. 442-453.

8. Andersson H., Cehlin M., Moshfegh B. Experimental and numerical investigations of a new ventilation supply device based on confluent jets. // Building and Environment. 2018. Vol. 137. pp. 18–33.

9. Chen H., Setareh J., Larsson U., Moshfegh B. Numerical investigation of ventilation performance of different air supply devices in an office environment // Building and Environment. 2015. Vol. 90. pp. 37–50.

10. Дацюк Т.А, Ивлев Ю.П., Пухкал В.А. Результаты моделирования микроклимата жилых помещений при различных типах отопительных приборов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №6 (41). С. 12–21.

11. Кузнецов С.Н., Колосов А.И., Кузнецова Г.А. Математическое моделирование вентиляции в помещении с гальваническими ваннами // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. 2017. №1. С. 111-117.

12. Jones W.P., Launder B.E. The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1972. Vol. 15. pp. 301-314.

13. Lien F S, Chen W L, Leschziner M A. Low-Reynolds-number eddy-viscosity modelling based on non-linear stress-strain/vorticity relations. Engineering Turbulence Modelling and Measurements 3. Editors: Rodi, Bergeles, Publisher: Elsevier. 1996. pp. 91-100.

14. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence modeling for engineering applications. AIAA Journal. 1994. Vol 32(8). pp. 1598-1605.

---

## References

1. Pozin G.M. Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie. 2006. №4. pp. 106-109.
2. Denisikhina D. M. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo, 2015. №5. pp. 38-48.
3. Ivanov V.V., Karaseva L.V., Tikhomirov S.A., Ponomarenko A.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4188/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4188/).
4. Palij A.V., Shevchenko K.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4648](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4648).
5. Ziganshin A.M., Gimadieva G.A., Batrova K.E. Izvestiya KGASU, 2017, №4, pp. 257-265.
6. Nielsen, P.V., Allard, F., Awbi, H.B., Davidson, L. and Schälin, A. Computational fluid dynamics in ventilation design. REHVA Guide Book 10. RHEVA. 2007. pp. 34–48.
7. Li, Y., Nielsen, P.V. Indoor Air. 2011. Vol. 21(6). pp. 442-453.
8. Andersson H., Cehlin M., Moshfegh B. Building and Environment. 2018. Vol. 137. pp. 18–33.
9. Chen H., Setareh J., Larsson U., Moshfegh B. Building and Environment. 2015. Vol. 90. pp. 37–50.
10. Datsyuk T.A, Ivlev Yu.P., Pukhkal V.A. Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal 2013. №6 (41). pp. 12–21.
11. Kuznetsov S.N., Kolosov A.I., Kuznetsova G.A. Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Vysokie tekhnologii. EHkologiya 2017. №1. pp. 111-117.
12. Jones W.P., Launder B.E. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1972. Vol. 15. pp. 301-314.



13. Lien F S, Chen W L, Leschziner M A. Low-Reynolds-number eddy-viscosity modelling based on non-linear stress-strain/vorticity relations. Engineering Turbulence Modelling and Measurements 3. Editors: Rodi, Bergeles, Publisher: Elsevier. 1996. pp. 91-100.
14. Menter F.R. AIAA Journal. 1994. Vol 32(8). pp. 1598-1605.