

Н.Е. КАДЫРБОЛАТ, студент (НАО «Шәкәрім университет»)  
Научный руководитель К.А. БЕРИКХАН, магистр естественных наук  
(НАО «Шәкәрім университет»)  
г. Семей

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ВОЗДУХА  
В ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ СИСТЕМЕ С УЧЁТОМ  
ВЛАГОПЕРЕНОСА**

**Введение**

Системы приточно-вытяжной вентиляции обеспечивают воздухообмен в помещениях и напрямую влияют на параметры микроклимата – температуру, влажность и скорость воздуха. В условиях высокой плотности людей или работы нагревающего оборудования контроль влажности становится критически важным для предотвращения конденсации и развития плесени [1, 2]. Однако при проектировании и CFD-анализе вентиляции зачастую учитывается только теплообмен без переноса влаги [2, 3], что снижает точность прогноза микроклимата и эффективность систем осушения или увлажнения воздуха. Моделирование турбулентных потоков с учётом влагопереноса позволяет оценивать не только температурные поля, но и распределение относительной и абсолютной влажности. Это необходимо для более точного расчёта микроклимата помещения и своевременного выявления зон риска конденсации. В ряде современных исследований показано, что совместное численное моделирование переноса теплоты и влаги в воздухе помещения повышает точность результатов [4, 5].

**Цель и задачи исследования**

Цель: выполнить численное моделирование турбулентного потока воздуха в вентиляционной системе с учётом переноса водяного пара и проанализировать влияние условий притока на распределение влажности в помещении.

Задачи исследования:

- сформулировать физико-математическую модель переноса влаги при турбулентном течении воздуха;
- реализовать эту модель в среде ANSYS Fluent или аналогичной CFD-платформе;
- провести расчёты при различных граничных условиях (температура, скорость и относительная влажность приточного воздуха);
- проанализировать распределение температуры и влажности в объёме помещения и на поверхностях стен;

- определить потенциальные зоны конденсации и предложить меры по их предотвращению.

### Физическая и математическая модель

Система уравнений, описывающих течения воздуха и перенос водяного пара, включает следующие соотношения.

Уравнение сохранения массы (неразжимность воздуха при устанавлившемся течении):

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

Уравнение движения (уравнение Навье-Стокса для несжимаемой турбулентной среды):

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(v \cdot \nabla)v = -\nabla p + \mu \Delta v + F \quad (2)$$

Уравнение переноса влагосодержания (конвективно-диффузионное уравнение для водяного пара в воздухе):

$$\frac{\partial(\rho Y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v Y) = \nabla \cdot (\rho D_{eff} \nabla Y) + S_m \quad (3)$$

где  $Y$  — массовая доля водяного пара в воздухе;  $D_{eff}$  — эффективный коэффициент диффузии водяного пара (с учётом турбулентного перемешивания);  $S_m$  — источник влаги (скорость испарения, например, с поверхности человека или оборудования).

Для замыкания модели турбулентности использована двухпараметрическая модель SST  $k-\omega$  [6], а перенос водяного пара реализован через модуль Species Transport в CFD-пакете ANSYS Fluent [7]. Турбулентный обмен влагой учитывается за счёт добавления турбулентной составляющей к молекулярному диффузионному коэффициенту  $D_{eff}$  согласно принятым моделям турбулентного массопереноса.

### Геометрия и граничные условия

Моделировалось прямоугольное помещение размерами  $4 \times 4 \times 2.8$  м. При расчёте приняты следующие граничные условия на поверхностях и отверстиях вентиляционной системы:

- приточная решётка: температура приточного воздуха  $20$   $^{\circ}$ С, относительная влажность  $RH = 50$  %, скорость потока  $1.5$  м/с;

- вытяжное отверстие: расположено на противоположной стене, на высоте  $2.2$  м от пола, с выходом воздуха при атмосферном давлении;

- ограждающие поверхности (стены, пол и потолок): температура стен поддерживается в диапазоне  $16-18$   $^{\circ}$ С (имитируя более прохладные наружные стены);

- источник влаги в помещении: непрерывное испарение влаги с поверхности человека (или эквивалентный влажный объект) с интенсивностью порядка 40 г/ч.

### Результаты моделирования

#### 1. Распределение относительной влажности

На уровне головы и выше формируются зоны повышенной относительной влажности (до ~65–70 %), тогда как у пола воздух заметно суще (~50–55 %) (рисунок 1). Это указывает на стратификацию влагосодержания по высоте помещения при недостаточно интенсивном турбулентном перемешивании воздуха.

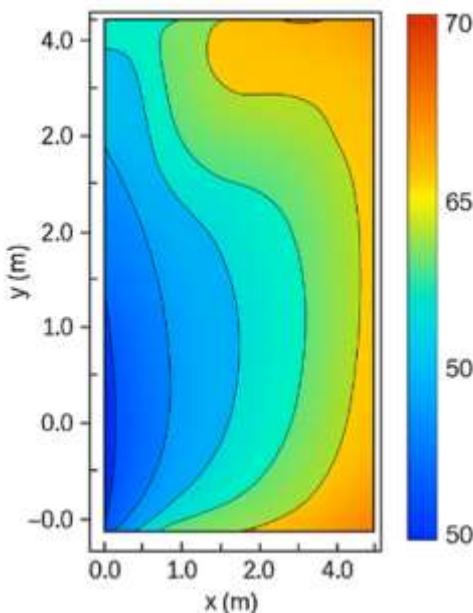


Рис. 1. Распределение относительной влажности в помещении при установившемся режиме вентиляции. Цветовая шкала соответствует значению массовой доли водяного пара (расчёт по модели Species Transport)

#### 2. Температурное поле и скорость воздуха

График (рисунок 2) демонстрирует выраженную тепловую стратификацию и наличие циркуляционных зон. Вентиляционный поток поднимается от приточной области снизу слева через зону источника влаги к вытяжному отверстию (показано стрелками), формируя замкнутые циркуляции. Вдоль холодных стен наблюдаются зоны замедленного движения воздуха, где возможна локальная конденсация из-за охлаждения влажного воздуха у поверхности.

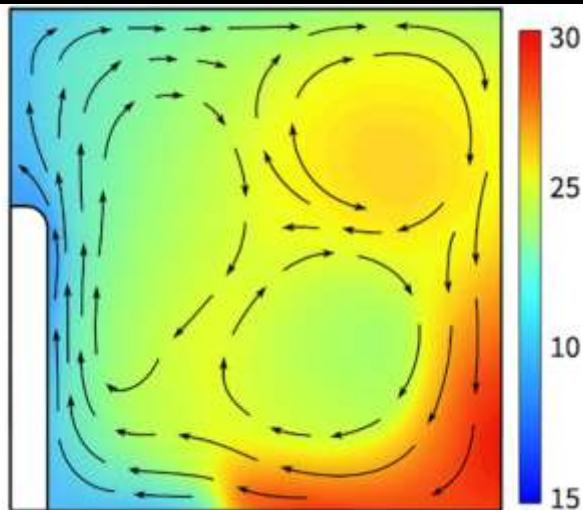


Рис. 2. Температурное поле и векторная карта воздушного потока в середине помещения

### 3. Численные результаты (таблица 1).

Таблица 1

#### Численные результаты

Параметр	Значение
$\Delta RH$ (разница относительной влажности по высоте)	до 15 %
Температура «точки росы» на стенах	15.5–16 °C
Максимальная относительная влажность у потолка	до 70 %
Погрешность модели по сравнению с экспериментом	< 7 %

$\Delta RH$  – разница между максимальной и минимальной относительной влажностью в комнате; «точка росы» определена для условий у стен; погрешность оценена сопоставлением с контрольными экспериментальными данными.

#### Обсуждение

Выявлено, что стратификация влажности воздуха в помещении усиливается при снижении интенсивности турбулентного перемешивания и при наличии локализованных источников испарения. Иными словами, недостаточное перемешивание приводит к скоплению влажного воздуха в верхней зоне, тогда как нижние слои остаются относительно сухими.

Тепловая стратификация потока обусловлена восходящими потоками тёплого воздуха, которые переносят влагу вверх. В результате относительная влажность повышается у потолка, что создаёт риск конденсации при охлаждении поверхностей ниже температуры точки росы. Точка росы  $T_{\text{росы}}$  для воздуха рассчитывалась по эмпирической зависимости:

$$\alpha = \frac{aT}{b+T} + \ln\left(\frac{\phi}{100}\right), T_{\text{росы}} = \frac{b\alpha}{a-\alpha}, \quad (4)$$

где  $T$  – текущая температура воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\phi$  – относительная влажность (%),  $a = 17.27$  и  $b = 237.7$  – эмпирические коэффициенты. Рассчитанные значения  $T_{\text{росы}}$  ( $15.5\text{--}16\text{ }^{\circ}\text{C}$  для условий у стен) согласуются с наблюдениями: поверхности стен с температурой ниже  $\sim 16\text{ }^{\circ}\text{C}$  могут стать очагами конденсации влаги при данных уровнях влажности воздуха.

### Выводы

Распределение влаги в помещении чувствительно к интенсивности турбулентности и расположению источников испарения. При слабом перемешивании наблюдается вертикальная стратификация влажности.

Включение моделирования влагопереноса в CFD-расчёт существенно повышает точность воспроизведения параметров микроклимата помещения.

Разработанная модель позволяет количественно оценивать эффективность вентиляции и выявлять зоны повышенного риска конденсации влаги.

При оптимизации системы вентиляции необходимо учитывать как тепломассообмен, так и массоперенос влаги для предотвращения образования конденсата на холодных поверхностях.

### Список литературы:

1. Богословский, В. Н., Кокорин, Э. Я., Петров, Л. В. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение. — М.: Стройиздат, 1982. — 511 с.
2. Кулаков, С.И., Денисюк, Е.В. CFD-моделирование теплового и воздушного режима кинотеатра. // Вестник Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, 2019. — № 1(78). — С. 115–122.
3. Дячек, П.И., Макаревич, С.А., Захаревич, А.Э., Ливанский, Д.Г. Математические методы в отоплении, вентиляции и кондиционировании воздуха. — Минск: Белорусский НТУ, 2018. — 220 с.
4. Steeman, H.-J., Van Belleghem, M., Janssens, A., De Paep, M. Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture-related damage. Building and Environment, 2009. — Vol. 44(10). — pp. 2176–2184.
5. Qin, M., Belarbi, R., Aït-Mokhtar, A., Allard, F. Simulation of coupled heat and moisture transfer in air-conditioned buildings // Automation in Construction, 2009. — Vol. 18(5). — pp. 624–631.
6. ANSYS Fluent Theory Guide. Release 2022.
7. ANSYS Fluent User Guide: Species Transport and Vaporization Models. Release 2022.

**Информация об авторах:**

Кадырболат Нурлат Ерболулы, студент специальности «Теплоэнергетика», НАО «Шекерим университет», 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, д. 20 А, ersinnur44@gmail.com

Берикхан Кайыржан Асетулы, магистр естественных наук, кафедра Технической физики и теплоэнергетики, НАО «Шекерим университет», 071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, д. 20 А, berikhan\_kaiyrzhan@mail.ru