УДК 624.9

# КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ВОЗДУХА В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ ТРИКОТАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

# COMPUTER MODEL OF TURBULENT AIR FLOWS IN VENTILATION SYSTEMS OF KNITTED PRODUCTION

*Н.Н. ЕЛИН, М.Ю. ОМЕТОВА, Г.В. РЫБКИНА*
*N.N. YELIN, M.YU. OMETOVA, G.V. RYBKINA*

**(Ивановский государственный политехнический университет)**
**(Ivanovo State Polytechnical University)**
E-mail: yelinnn@mail.ru;

***Разработана математическая модель потоков воздуха в системах вентиляции трикотажного производства, в которой турбулентность описана с помощью модели Рейнольдса-Буссинеска. Для эмпирического обеспечения модели использованы данные экспериментальных исследований полей скорости и температуры на одном из промышленных объектов. Компьютерная***

***реализация модели предлагается для совершенствования систем воздухораспределения в теплонапряженных помещениях.***

***A mathematical model of air flows in ventilation systems of knitted production was developed, in which the Reynolds-Boussinesq model was used to describe turbulence. For the empirical support of the model, data from experimental studies of the velocity and temperature fields on one of the industrial objects were used. Computer implementation of the model is proposed for the improvement of air distribution systems in heat-stressed premises.***

**Ключевые слова: вентиляция, воздухораспределение, воздушный поток, турбулентность, профиль скорости.**

**Keywords: ventilation, air distribution, air flow, turbulence, velocity profile.**

Реконструкция производственного процесса текстильных предприятий и связанное с ней увеличение теплонапряженности производственных помещений вследствие замены оборудования на более производительное приводит к тому, что существующие системы вентиляции не справляются с подачей необходимого количества воздуха заданных параметров. Данная проблема может быть решена путем подачи воздуха непосредственно под технологическое оборудование. При этом в рабочей и в технологической зонах цеха температурно-влажностные параметры воздуха различны. Поэтому совершенствование систем воздухораспределения с целью обеспечения заданных локальных параметров воздушной среды при минимальных энергетических затратах является актуальной задачей.

Сравнение с экспериментальными данными результатов известных работ по моделированию и расчету систем воздухораспределения [1], [2], в которых воздушные потоки рассматриваются как двухмерные, без учета их начальной турбулентности и конструктивных особенностей воздухораспределительных устройств, выявило существенные расхождения.

Нами предлагается математическая модель газодинамических потоков, генерируемых воздухораспределителем произвольной конфигурации, базирующаяся на безразмерных уравнениях энергии Навье-Стокса и неразрывности [3], в которых параметры турбулентности учитываются величиной эффективной вязкости. В качестве масштабов гидродинамических величин приняты: для скорости – начальная скорость на входе воздушного выпуска, для давления – атмосферное давление, в качестве характерного размера принят размер области, за пределами которой параметры воздушной среды постоянны. Схема области, в которой осуществляется моделирование, показана на рис. 1.

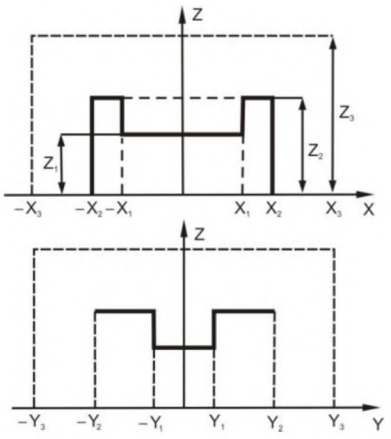



Рис. 1

Границами области являются: плоскость $z = z_3$, на которой давление считается равным $P_0$, плоскость $x = \pm x_3$, на которой скорость и давление постоянны, и плоскость $y = \pm y_3$, на которой задается условие симметрии профиля скорости.

Распределение скоростей на входе выпуска задается исходя из известных характеристик воздуховода, полученных в результате его испытания.

В процессе моделирования необходимо вводить переменную по пространству

турбулентную вязкость, значительно превышающую молекулярную. Для этого вблизи стенок использовали модель Рейнольдса-Буссинеска [4], а вдали от них турбулентность считалась изотропной, и эту величину определяли из условия наилучшего совпадения рассчитанных величин скоростей с экспериментальными данными.

В расчетах применяли простейшие конечно-разностные схемы "назад" для аппроксимации производных по пространству и схемы "вперед" для аппроксимации производных по времени. В результате все дифференциальные операторы по пространству в уравнениях Навье – Стокса были заменены разностными схемами второго порядка точности, по времени использовалась явная схема первого порядка [5].

Адаптацию математической модели к реальным условиям эксплуатации осуществляли путем сравнения результатов расчетов с данными экспериментального исследования лункообразного воздухораспределителя, генерирующего встречно-соосные струи, при нижней подаче приточного воздуха на трикотажном производстве.

В качестве объекта исследования выбран цех с размерами 12×14×3,5 м с чулочно-вязальными автоматами, в котором приточный воздух подается непосредственно в технологическую зону по 15 воздуховодам через лункообразные воздухораспределители. На каждом воздуховоде установлено двенадцать лункообразных приточных выпусков, через каждый выпуск размером 150×50×50 мм подается примерно 110 м$^3$/ч воздуха. Удаление воздуха общеобменной вентиляцией производится сосредоточенно на расстоянии 15 м от опытного участка через открывающуюся фрамугу. Схема объекта показана на рис. 2: П-1 – П-15 – приточные воздуховоды; 1 – 55 – точки замеров параметров воздушной среды; 27 – 29 – теплонапряженные точки.

В опытах, которые проводились после установления стационарного режима микроклимата, одновременно измеряли: параметры и расход приточного воздуха в приточных воздуховодах, параметры воздуха в рабочей и технологической зонах.

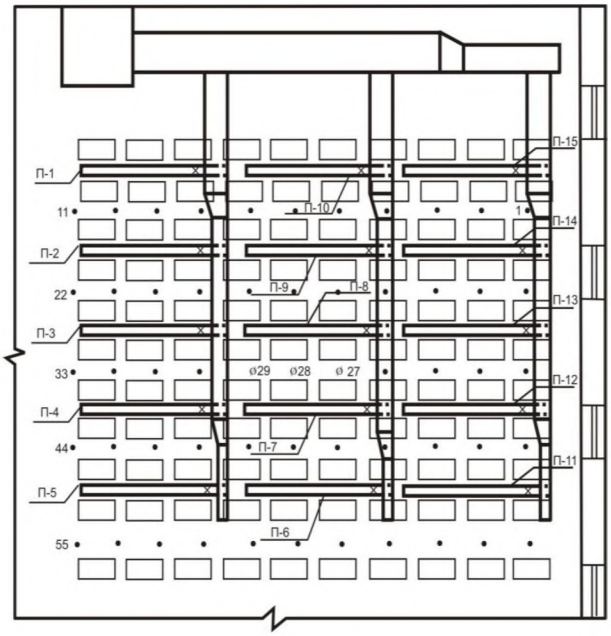



Рис. 2

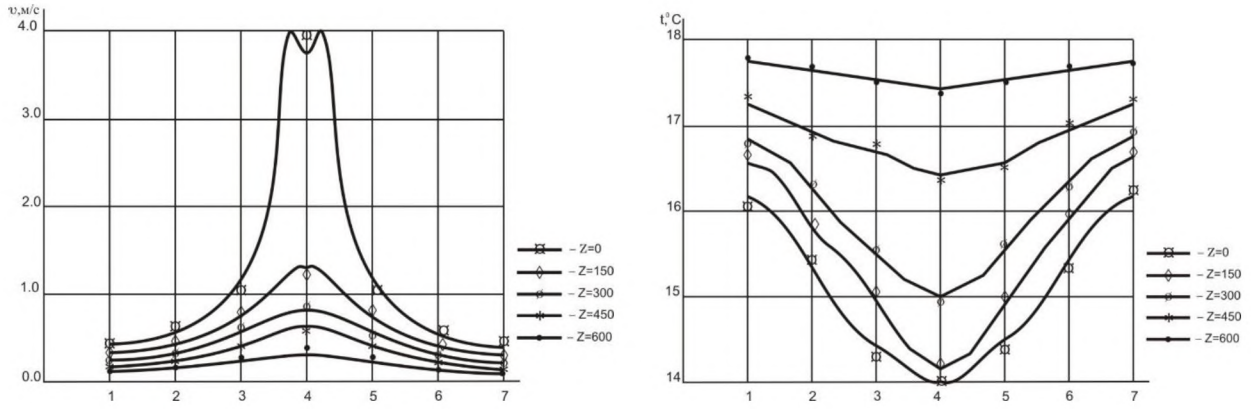
Изучение скоростных, температурных и влажностных полей приточной струи проводили над воздуховодами, расположенными в наиболее теплонапряженном участке рабочей зоны. Отклонение параметров воздушного потока в этих воздуховодах от среднего по цеху значения не превышает 5%.

Замеры параметров воздушной среды проводили по всей длине приточных воздуховодов в теплонапряженной зоне цеха через 0,5 м по длине воздуховода, параметры приточной струи замеряли через каждые 150 мм по горизонтали и вертикали. Температуру и влажность измеряли термогигрометром testo Saveris 2-H2, WI-FI логгер со встроенным разъемом для подключения зонда температуры/влажности. Точность измерения температуры составляла ±0,5°С в диапазоне 17,5…35,5°С, относительной влажности – ±2% в диапазоне 54,5…56%. Измерение скорости воздушной среды проводили термоанемометром "ТКА-ПКМ"(52) с классом точности 0,05 м/с, в диапазоне от 0,3 до 5 м/с. Расход приточного воздуха через воздуховод измеряли с помощью термоане-

мометрического расходомера ЭМИС-ТЭРА 280 с классом точности ±1% в диапазоне 12000…26000 м$^3$/ч.

При сравнении результатов расчетов с экспериментальными данными определяли неизвестные параметры модели: турбулентную вязкость воздуха и уточняли граничные условия. Установлено, что характер граничных условий значительно влияет на продолжительность вычислительного процесса.

Численные эксперименты показали, что при модельной турбулентной вязкости $0{,}15 \cdot 10^{-1}$ м$^2$/с можно добиться распределения скорости по вертикальной оси, близкой к экспериментальной с точностью не менее 10%. При этом расчетная турбулентность потоков в горизонтальном направлении оказывается несколько заниженной по сравнению с экспериментальными результатам.




а) б)

Рис. 3

На рис. 3 в качестве примера показаны некоторые результаты сопоставления расчетных и экспериментальных профилей скорости (а) и температуры (б) в технологической зоне производственного помещения на различном расстоянии от лункообразного воздухораспределителя.

## ВЫВОДЫ

В результате экспериментальных исследований установлено, что характеристики турбулентности воздушных потоков в системах вентиляции могут быть с достаточной точностью описаны моделью Рейнольдса-Буссинеска. Предлагаемая математическая модель и ее компьютерная реализация позволяют моделировать турбулентные потоки воздуха в системах вентиляции трикотажного производства. Результаты работы могут быть использованы для совершенствования систем воздухораспределения в теплонапряженных помещениях с целью обеспечения заданных локальных параметров воздушной среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Киселев Н.В., Каравайков В.М.* Распределение теплоносителя в системе воздушного отопления и вентиляции промышленного предприятия // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012, №3. С. 129…132.

2. *Новиков А.В.* Статистический подход имитационного моделирования температурно-влажностного режима эксплуатации оборудования в текстильном отделочном производстве // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, №6. С. 160…165.

3. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Дрофа, 2003.

4. *Хинце И.О.* Турбулентность. – М.: Гос. изд. физ.-мат. литературы, 1963.

5. *Елин Н.Н., Ометова М.Ю., Рыбкина Г.В.* Численное моделирование вентиляционных потоков в теплонапряженных помещениях небольшой высоты//В сб.: Молодежь и наука: реальность и будущее. Материалы VIII Междунар. научн.-практ. конф. – Иваново, 2015. С. 91…92.

## REFERENCES

1. Kiselev N.V., Karavajkov V.M. Raspredelenie teplonositelja v sisteme vozdushnogo otoplenija i ventiljacii promyshlennogo predprijatija // Izv. vuzov.

Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2012, №3. S.129…132.

2. Novikov A.V. Statisticheskij podhod imitacionnogo modelirovanija temperaturno-vlazhnostnogo rezhima jekspluatacii oborudovanija v tekstil'nom otdelochnom proizvodstve // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2013, №6. S.160…165.

3. Lojcjanskij L.G. Mehanika zhidkosti i gaza. – M.: Drofa, 2003.

4. Hince I.O. Turbulentnost'. – M.: Gos. izd. fiz.-mat. literatury, 1963.

5. Elin N.N., Ometova M.Ju., Rybkina G.V. Chislennoe modelirovanie ventiljacionnyh potokov v teplonaprjazhennyh pomeshhenijah nebol'shoj vysoty // V sb.: Molodezh' i nauka: real'nost' i budushhee. Materialy VIII Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. – Ivanovo, 2015. S. 91…92.

Рекомендована кафедрой гидравлики, теплотехники и инженерных сетей. Поступила 10.04.17.