

УДК 697.9:536.2

## РАЗВИТИЕ СТРУИ НАД НАГРЕТОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Докт. техн. наук, проф. ДЯЧЕК П. И.,  
канд. техн. наук ЗАХАРЕВИЧ А. Э., асп. ГРАЧЕВ И. Ю.

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: [tg\\_v\\_fes@bntu.by](mailto:tg_v_fes@bntu.by)

На основании математической модели процессов переноса теплоты и массы исследуется развитие тепловой загрязненной воздушной струи, формируемой над поверхностью протяженной нагретой плиты. Приводятся результаты численных расчетов, выполненных с целью поиска способа исключить выход загрязняющих веществ за пределы вытяжного зонта при наличии внешних воздействий. Рассматриваются три варианта удлинения свесов зонта: с обеих сторон, со стороны раздачи приточного воздуха, со стороны, противоположной расположению воздухораспределителей. Сравнение последствий применения указанных вариантов конструктивного решения зонта позволило установить, что наибольшее снижение утечек дает свес, расположенный со стороны набегающего потока воздуха. Установлено, что удлинение боковых свесов зонта не обеспечивает полной локализации загрязненной конвективной струи.

В ходе работы исследованы несколько вариантов использования экранов, расположенных со стороны бокового потока воздуха. Наилучший результат наблюдается в условиях применения экрана, симметрично расположенного относительно зазора между зонтом и плитой. Анализ локальных значений полей температуры и скорости в данном случае показывает, что утечка нагретого загрязненного воздуха в пространство цеха практически отсутствует. Установлено, что тепловая струя наиболее эффективно может быть локализована при условии симметричного относительно зонта распределения приточного воздуха. Рассматривается влияние открытых ворот на формирование конвективной струи в пространстве цеха с тепловыделениями. Отмечается смещение восходящей струи в противоположную от ворот сторону. Поступление лучистой теплоты от плиты имеет большое значение в формировании поля температуры близко расположенных участков поверхностей пола и стен.

**Ключевые слова:** численное моделирование, механическая вентиляция, вытяжной зонт, конвективная струя, поле температуры, поле скорости.

Ил. 7. Библиогр.: 11 назв.

## DEVELOPMENT OF HEATED STREAM ABOVE THE HORIZONTAL SURFACE

DIACHEK P. I., ZAKHAREVICH A. E., HRACHOU I. Yu.

*Belarusian National Technical University*

The development of thermal contaminated air stream formed above the surface of lengthy heated plate is investigated on the basis of the mathematical model of heat and mass transfer processes. The numerical simulation results performed for the purpose of finding a way to prevent the contaminants outflow from the hood in the presence of external influence are given. Three variants of the hood side panels lengthening are considered: on either side; on the side of the fresh air supply; on the side opposite to the location of air distributors. Comparison of the effects of using these variants of hood design allowed determining that the hood panel located on the side of the coming air flow gives the greatest leakage reduction. It is found out that lengthening of the hood side panels does not ensure full localization of the contaminated convective stream.

Several variants of using the screen located on the side of the lateral air flow were investigated in the course of work. Best result is observed under conditions of application of the

screen symmetrically located relative to spacing between the hood and the plate. The analysis of local values of temperature and velocity fields in this case shows that losses of heated contaminated air to the workshop space are practically absent. It is found out that the convective stream can be most efficiently localized under the condition of hood-symmetric distribution of supply air. Influence of the open gate on convective stream formation in the workshop space with heat emission is considered. The shift of upward flow to the opposite side relative to the gate is observed. The radiant heat release from the board is of great importance in the temperature field formation of closely located areas of floor and walls surfaces.

**Keywords:** numerical simulation, mechanical ventilation, hood, convective stream, temperature field, velocity field.

Fig. 7. Ref.: 11 titles.

**Введение.** Вентиляция промышленных зданий играет определяющую роль в обеспечении нормируемых условий внутренней воздушной среды. Поддержание требуемых параметров воздуха рабочей зоны обеспечивает необходимые условия для работы персонала и реализации технологических процессов.

Многие технологические процессы сопряжены с выделением теплоты и вредных веществ. Для исключения рассеивания вредностей в воздушном пространстве таких цехов применяют местную вытяжную вентиляцию, предназначенную для удаления загрязненного воздуха от мест его выделения. Достоинством данного подхода, по сравнению с применением общеобменной вентиляции, является уменьшение суммарной производительности вентиляционных установок и повышение качества воздуха рабочей зоны.

Традиционные методики проектирования устройств местной вытяжной вентиляции (местных отсосов) не учитывают множество возмущающих факторов, которые имеют место в реальных условиях эксплуатации, например потоков воздуха, вызванных постоянным или периодическим открыванием ворот и (или) фонарей цеха; схему распределения приточного воздуха, особенности развития конвективных струй и др. Максимально полно и достоверно учесть основные факторы, воздействующие на работу местных отсосов, можно при использовании численного решения дифференциальных уравнений переноса теплоты и массы при учете конкретных краевых условий. В настоящее время численное моделирование широко используется для проектирования и оптимизации работы существующих вентиляционных систем [1–3].

Традиционные методики проектирования, например вытяжных зонтов, не учитывают особенности развития конвективных струй над тепловыделяющим оборудованием и, в частности, влияния на этот процесс формирующейся в цехе под действием других факторов циркуляции воздушных потоков [4–7]. Авторы отмечают, что боковые потоки воздуха негативно влияют на эффективность работы вытяжных зонтов, однако единственный вариант расчета с учетом так называемой скорости движения воздуха в помещении представлен в [8], в то же время рекомендации по определению значения данного параметра не приводятся. Стандартная методика, позволяющая оценить анализируемую скорость, основана на расчете развития приточных струй [9]. Однако получаемый результат нельзя назвать удовлетворительным, поскольку расчетные формулы не отражают реальные

условия развития струй в пространствах, стесненных оборудованием, коммуникациями и конструкциями.

**Постановка задачи.** Цель исследования – на основе применения вытяжного зонта найти условия полной локализации конвективной струи, формируемой линейной нагретой плитой, с поверхности которой выделяются вредные вещества. Для решения задачи использованы: уравнения движения (Навье – Стокса с допущением Буссинеска – Обербека), уравнение сплошности и уравнение переноса теплоты, представленные в [10]. Принято допущение о том, что в нагретой струе загрязняющие вещества содержатся в количествах, которые не влияют на развитие струи. В связи с этим в математическую модель нет необходимости включать дифференциальные уравнения, описывающие перенос загрязняющих веществ. На этом основании в расчетах численные значения физических параметров приняты как для чистого воздуха.

С целью учета турбулентного характера движения воздуха использована  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности [11]. Радиационный теплообмен в данной задаче не рассматривается по причине диатермичности (прозрачности) воздуха с малой степенью загрязнения газовыми и механическими примесями.

В данной публикации приводятся результаты исследования установившегося поля скоростей и температур восходящей конвективной струи, формируемой над протяженной нагретой плитой. На поверхностях ограждений и зонта приняты адиабатические условия. В качестве граничных для горячей плиты заданы условие прилипания (для уравнений движения) и фиксированная температура поверхности (граничное условие первого рода для уравнения переноса теплоты). Принято решение исключить из анализа поддерживающую конструкцию, на которой размещается плита, поскольку она не оказывает существенного влияния на формирование нагретой струи.

Исследуемые процессы являются трехмерными, однако при большой протяженности плиты влияние концевых участков на процессы переноса в средней части плиты пренебрежимо мало и поэтому изучение закономерностей формирования полей температуры и скорости можно осуществить в плоской системе координат. Например, в технологии производства плит МДФ/ХДФ в ОАО «Витебскдрев» при ширине движущейся по конвейеру плиты 2,6 м длина составляет 30,0 м. Другие факторы, требующие провести исследование в трехмерной системе координат, отсутствуют. Были выполнены тестовые расчеты для задачи в двухмерной и трехмерной постановках. Результаты согласуются с достаточной степенью точности.

При движении плиты по конвейеру выделяются формальдегид, аммиак, пары парафина и др. В данной публикации представляются результаты расчетов исследуемых полей для средней части плиты, т. е. рассматривается сечение плиты и зонта, перпендикулярное направлению перемещения плиты на конвейере. Вытяжные патрубки зонта в двумерной задаче представлены эквивалентной по площади щелью, вытянутой вдоль конвейера. Переход от круглых локальных вытяжных патрубков к щели выполнен с сохранением расхода воздуха, удаляемого зонтом. Расчеты в 3D-постановке задачи показали правомочность такого подхода.

Основные геометрические характеристики задачи взяты применительно к реальному объекту: высота цеха составляет 11 м, ширина в сечении расчетной области – 18 м, расстояние от стены, расположенной слева, до плоскости симметрии конвейера, плиты и зонта – 7 м. Ширина плиты МДФ – 2,60 м, толщина – 0,04 м (максимальная из номенклатурного ряда). Верхняя грань плиты находится на высоте 1,1 м от пола. Ширина зонта – 2,68 м, расстояние по вертикали от низа зонта до его вытяжной щели – 1,68 м, зазор между зонтом и плитой – 0,72 м.

Начальная температура внутренней воздушной среды и температура приточного воздуха заданы на уровне 19 °С, температура поверхности плиты в начале конвейера 140 °С.

**Результаты расчетов.** Результаты расчетов для случая симметричного подвода приточного воздуха, компенсирующего его удаление зонтом, и отсутствия других факторов, определяющих асимметрию конвективных потоков, представлены на рис. 1. Плоскость симметрии задачи перпендикулярна плоскости изображения и показана тонкой линией. Здесь и далее на рисунках приведен фрагмент расчетной области, представляющий интерес для изучения. Отображены поперечное сечение зонта с вытяжным отверстием и начальным участком вытяжного канала, плита МДФ и поверхность пола. Расчетное поле температуры представлено изотермами с указанием значения температуры. Поле скорости изображено в виде векторов, длина которых определяется абсолютным значением скорости в данной точке.

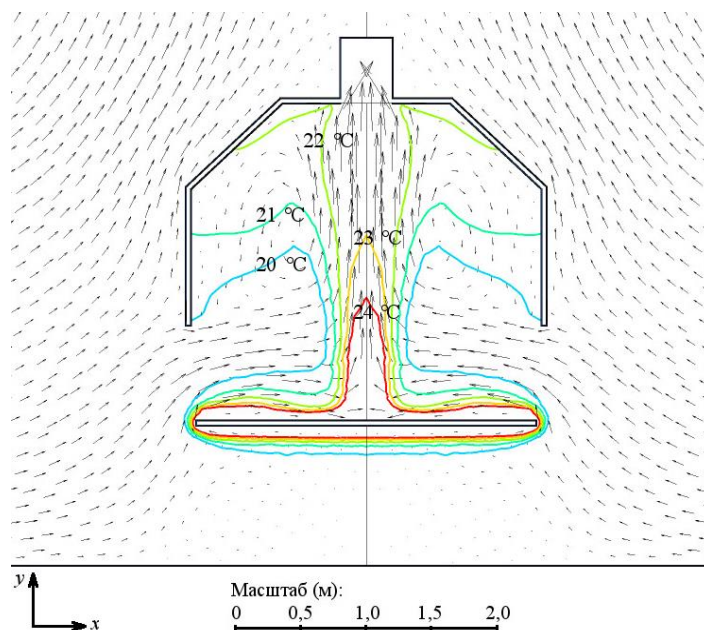


Рис. 1. Поля температуры и скорости при отсутствии боковых потоков воздуха в цехе (здесь и далее на других рисунках температура поверхности плиты 140 °С)

Видно, что для оговоренных условий конструкция зонта обеспечивает эффективное удаление выделяющихся вредностей. При раздаче компенсирующего вытяжку приточного воздуха только с одной стороны зонта про-

исходит снос тепловой струи за его пределы (рис. 2). В данном случае в пространстве цеха образуется вихрь, формируемый вышедшей за пределы зонта конвективной струей. Поэтому в левой части изображения можно наблюдать частичный возврат нагретого воздуха (см. изотермы для 20 °С и 21 °С), прошедшего вместе с указанным вихрем путь вверх к покрытию цеха, затем к левой стене и обратно к зонту.

Отметим, что здесь и в последующих расчетах вытяжная щель в верхней части зонта удаляет заданное количество воздуха, неизменное по сравнению с первым расчетом. Более детально представить поле скоростей в вытяжной щели в масштабе всего изображения в данном исследовании нецелесообразно.

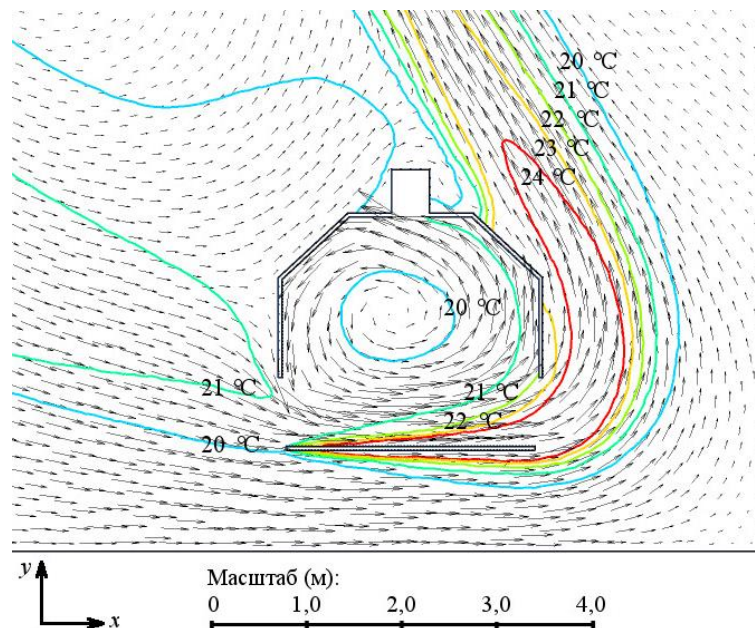


Рис. 2. Поля температуры и скорости при наличии бокового потока воздуха

Предположим, что локализацию тепловой струи и эффективное удаление выделяющихся вредностей можно решить путем удлинения боковых свесов зонта:

- удлинение с обеих сторон с изменением просвета с 0,72, например, до 0,30 м (результаты расчетов представлены на рис. 3);
- удлинение только со стороны раздачи приточного воздуха (рис. 4);
- удлинение со стороны, противоположной расположению воздухораспределителей (рис. 5).

Видно, что ни один из вариантов с применением удлиненных свесов не позволяет исключить уход нагретого загрязненного воздуха в пространство цеха. Сравнение эффекта от применения различных вариантов удлинения свесов показывает, что наибольший эффект снижения утечек дает свес, расположенный со стороны набегающего потока воздуха (рис. 4). Результаты, представленные на рис. 3 и 4, близки по количеству нагретого загрязненного воздуха, уходящего за пределы зонта.

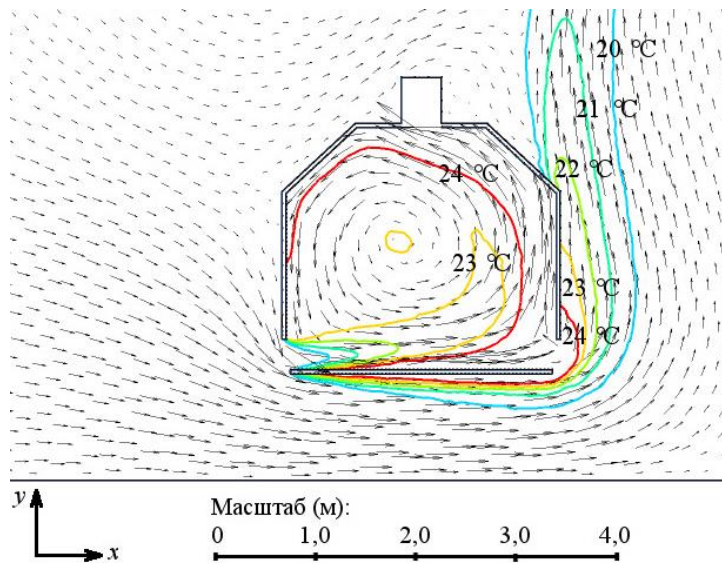


Рис. 3. Поля температуры и скорости при наличии бокового потока воздуха.  
Удлиняющие свесы – с обеих сторон зонта

Вариант со свесом, размещенным справа (рис. 5), незначительно отличается от исходного варианта без использования свесов (рис. 2). В пространстве цеха формируется циркуляция, характеризующаяся возникновением вихря, закрученного против часовой стрелки и возвращающего в разбавленном состоянии нагретый и загрязненный воздух к вытяжной системе (рис. 5, изотерма 20 °C слева).

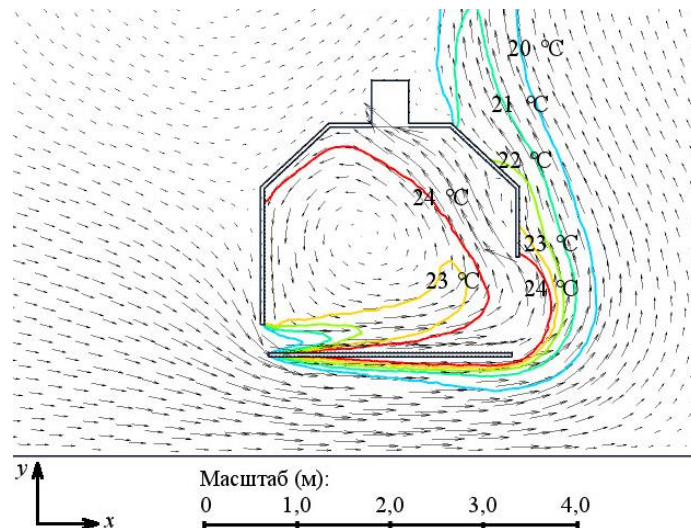


Рис. 4. Поля температуры и скорости при наличии бокового потока воздуха.  
Удлиняющий свес – слева (со стороны бокового потока)

Удлинение свеса, размещенного со стороны раздачи приточного воздуха, до отметки конвейера позволило бы достигнуть полного исключения выхода нагретого загрязненного воздуха в пространство цеха. Однако это

затруднило бы визуальный контроль состояния плиты и конвейера и недопустимо по технологическим требованиям. Удлиненные свесы к тому же усложняют выполнение периодических работ по обслуживанию оборудования конвейера.

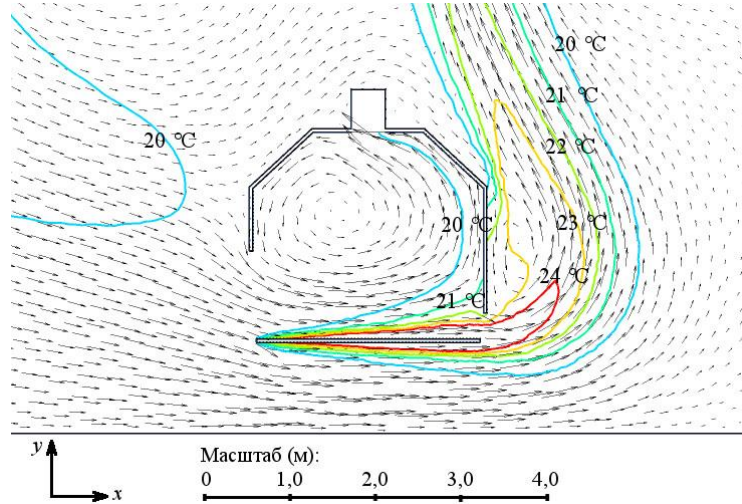


Рис. 5. Поля температуры и скорости при наличии бокового потока воздуха. Удлиняющий свес – справа

Результат расчета с экраном, установленным со стороны набегающего потока симметрично относительно зазора между зонтом и плитой, представлен на рис. 6. Экран выступает вверх и вниз относительно указанного зазора на 0,5 м. Поля температуры и скорости показывают, что утечка нагретого загрязненного воздуха в пространство цеха практически отсутствует.

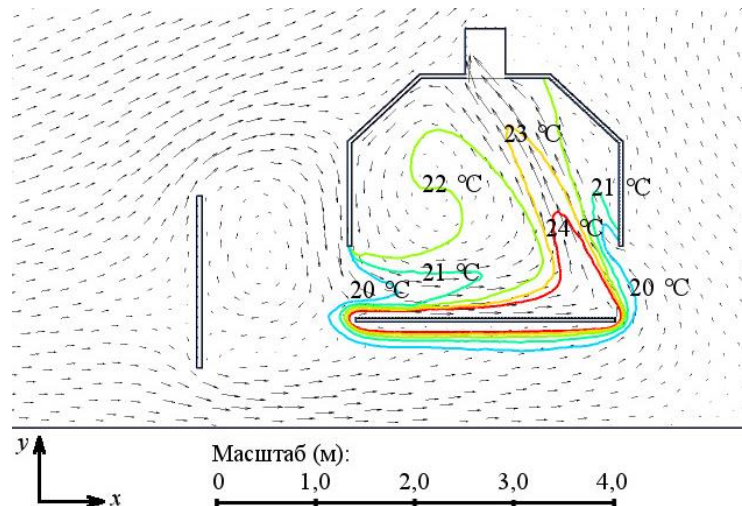


Рис. 6. Поля температуры и скорости при наличии бокового потока воздуха и экрана

Авторами также исследованы два варианта с экранами, отличающимися от представленного на рис. 6 отметкой низа экрана (отметка верха экрана остается неизменной). В одном случае экран устанавливается непосред-

ственно на пол, в другом – с зазором 0,3 м между низом экрана и поверхностью пола. В обоих случаях при обтекании экрана потоком формируется циркуляция воздуха, которая приводит к частичному выходу нагретых газов за пределы зонта со стороны экрана. Выход конвективной струи за пределы зонта в этом случае значительно меньше по величине в сравнении с использованием различных вариантов удлиненных свесов.

Причина возникновения утечки в расчетах с другими размерами экранов, по мнению авторов, заключается в большем различии параметров движения воздушной среды в верхней и нижней частях пространства между экраном и зонтом с плитой, чем в случае симметричного расположения экрана относительно зазора между зонтом и плитой (рис. 6). Экран следует располагать с обеих сторон от конвейера, поскольку направление бокового потока может изменяться при перемене наружных метеорологических условий, открывании дверей, изменении режима работы приточных и вытяжных установок, обслуживающих цех.

Полученные результаты использованы при разработке рекомендаций по устройству системы вентиляции для ОАО «Витебскдрев». Боковой снос воздуха, рассмотренный в исследовании, как отмечено выше, может быть обусловлен и поступлением воздуха через открытые ворота. Формирующееся при этом трехмерное поле температуры рассмотрено на примере другого цеха и частично представлено на рис. 7.

Габариты цеха:  $12 \times 24 \times 10(h)$  м. Удаление воздуха осуществлялось через фонарь в покрытии (размеры  $1 \times 12$  м). Приток наружного воздуха ( $t = 10$  °C) осуществлялся через ворота  $4 \times 4$  м в торцевой стене.

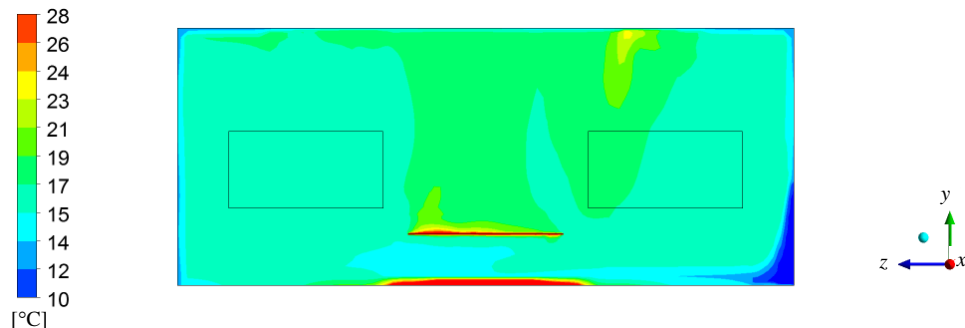


Рис. 7. Поле температуры в плоскости симметрии цеха ( $z-y$ )

Поле скоростей воздушной среды цеха формируется под воздействием потока наружного воздуха и восходящей тепловой струи над нагретой плитой. Поле температуры ограждений (рис. 7) формируется за счет конвективного переноса теплоты потоками воздуха и радиационного теплообмена с нагретой плитой. Поступление лучистой теплоты от плиты имеет наибольшую интенсивность для близко расположенных участков поверхностей пола и стен.

В области ворот наблюдались пониженные температуры по причине настипания вдоль пола поступающего наружного воздуха. Восходящая струя при взаимодействии с боковым потоком смещалась относительно центра плиты в сторону, противоположную открытым воротам.



## ВЫВОДЫ

1. Традиционные методики проектирования не позволяют адекватно оценить последствия физических процессов, происходящих при работе систем вентиляции. Результаты исследования показали, что формирование конвективной струи над горячей горизонтальной поверхностью сопровождается образованием шейки, что не учитывается общепринятыми методиками определения размеров вытяжного зонта. Значение угла раскрытия зонта, близкое к  $60^\circ$ , не гарантирует равномерное всасывание по всей плоскости входного отверстия.

2. Традиционные методики не учитывают влияние способа распределения приточного воздуха и другие причины появления боковых потоков на формирование конвективных струй над источниками теплоты и работу местной вытяжной вентиляции.

3. Применение компьютерного моделирования на основе системного анализа процессов переноса позволяет с минимальными затратами времени и средств найти оптимальное решение задач по обеспечению эффективной работы вентиляции в зданиях различного назначения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lien, J. Numerical Evaluation of Wind Driven Ventilator for Enhanced Indoor Air Quality / J. Lien, N. Ahmed // *Procedia Engineering*. – 2012. – Vol. 49. – P. 124–134.
2. Pinelli, M. A Numerical Method for the Efficient Design of Free Opening Hoods in Industrial and Domestic Applications / M. Pinelli, A. Suman // *Energy*. – 2014. – Vol. 74. – P. 484–493.
3. Wang, C. Study on Parametric and Numerical Simulation of Local Forced Ventilation / C. Wang, G. Wu, G. Wang // *Procedia Engineering*. – 2012. – Vol. 45. – P. 786–792.
4. Ф и л ь н е й, М. И. Проектирование вентиляционных установок: учеб. пособие для специальности «Теплогоснабжение и вентиляция» / М. И. Фильней. – М.: Высш. шк., 1966. – 206 с.
5. В н у т р е н н и е санитарно-технические устройства. Справочник проектировщика: в 2 ч. / под ред. И. Г. Старовойта. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1977. – Ч. 2: Вентиляция и кондиционирование воздуха. – 502 с.
6. Д р о з д о в, В. Ф. Отопление и вентиляция: учеб. пособие для специальности «Теплогоснабжение и вентиляция»: в 2 ч. / В. Ф. Дроздов. – М.: Высш. шк., 1984. – Ч. 2: Вентиляция. – 263 с.
7. Б а т у р и н, В. В. Основы промышленной вентиляции / В. В. Батурин. – 4-е изд. – М.: Профиздат, 1990. – 448 с.
8. В н у т р е н н и е санитарно-технические устройства: справ. проектировщика: в 3 ч. – М.: Стройиздат, 1990–1992. – Ч. 3: Вентиляция и кондиционирование воздуха / под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. – 4-е изд. – 1992. – Кн. 1. – 319 с.
9. В н у т р е н н и е санитарно-технические устройства: справ. проектировщика: в 3 ч. – М.: Стройиздат, 1990–1992. – Ч. 3: Вентиляция и кондиционирование воздуха / под ред. Н. Н. Павлова, Ю. И. Шиллера. – 4-е изд. – 1992. – Кн. 2. – 416 с.
10. З а х а р е в и ч, А. Э. Формирование параметров микроклимата в отапливаемых помещениях в условиях естественной конвекции: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / А. Э. Захаревич; БНТУ. – Минск, 2012. – 22 с.
11. F e r z i g e r, J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. H. Ferziger, M. Peric. – 3<sup>rd</sup> rev. ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002. – 423 p.

## REFERENCES

1. L i e n, J., & Ahmed, N. (2012) Numerical Evaluation of Wind Driven Ventilator for Enhanced Indoor Air Quality. *Procedia Engineering*, 49, 124–134. doi: 10.1016/j.proeng.2012.10.120.
2. P i n e l l i, M., & Suman, A. (2014) A Numerical Method for the Efficient Design of Free Opening Hoods in Industrial and Domestic Applications. *Energy*, 74, 484–493. doi:10.1016/j.energy.2014.07.014.
3. W a n g, C., Wu, G., & Wang, G. (2012) Study on Parametric and Numerical Simulation of Local Forced Ventilation. *Procedia Engineering*, 45, 786–792. doi: 10.1016/j.proeng.2012.08.240.
4. F i l n e y, M. I. (1966) *Design of Ventilation Installations*. Moscow, Vysshaia Shkola. 206 p. (in Russian).
5. S t a r o v e r o v, I. G., Sargin, Iu. N., Druskin, L. I., Pokrovskaja, I. B., Smirnova, K. A., Finkel'shtein, S. M., & Khlybov, B. M. (1977) *Internal Sanitary-Engineering Installations. Part 2: Ventilation and Air-Conditioning*. Moscow, Stroyizdat. 502 p. (in Russian).
6. D r o z d o v, V. F. (1984) *Heating and Ventilation. Part 2: Ventilation*. Moscow, Vysshaia Shkola. 263 p. (in Russian).
7. B a t u r i n, V. V. (1990) *Fundamentals of Industrial Ventilation*. 4<sup>th</sup> Publication. Moscow, Profizdat. 448 p. (in Russian).
8. P a v l o v, N. N., & Shiller, Yu. I. (1992) *Internal Sanitary-Engineering Installations. Part 3: Ventilation and Air-Conditioning. Book 1*. Moscow, Stroyizdat. 319 p. (in Russian).
9. P a v l o v, N. N., & Shiller, Yu. I. (1992) *Internal Sanitary-Engineering Installations. Part 3: Ventilation and Air-Conditioning. Book 2*. Moscow, Stroyizdat. 416 p. (in Russian).
10. Z a k h a r e v i c h A. E. (2012) *Formirovanie Parametrov Mikroklimate v Otaplivaemykh Pomeshcheniyakh v Usloviyakh Estestvennoi Konveksii: Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Organization of Internal Environment in Heated Buildings at Natural Circulation: Abstract of Ph. Diss. Thesis]. Minsk. 22 p. (in Russian).
11. F e r z i g e r, J. H., & Peric, M. (2002) *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3<sup>rd</sup> rev. ed. Berlin, Springer. 423 p.

Представлена кафедрой  
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 09.09.2014