УДК 697.12

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-155-160

© В. К. Аверьянов, советник генерального директора
(АО «Газпром промгаз»)

© V. K. Averyanov, Advisor of the CEO
(JSC «Gazprom Promgaz»)

© В. М. Уляшева, д-р техн. наук, профессор

© V. M. Ulyasheva, Dr. Sci. Tech., Professor

© Г. А. Рябев, аспирант

© G. A. Ryabev, post-graduate student

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

(Saint Petersburg State University of Architecture and
Civil Engineering)

E-mail: yageorgy@gmail.com

E-mail: yageorgy@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ЧЕРЕЗ УТЕПЛЕННЫЕ И НЕУТЕПЛЕННЫЕ ПОЛЫ

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER PROCESS THROUGH INSULATED AND NON-INSULATED FLOOR

В производственных помещениях традиционно используются неутепленные полы на грунте. В результате, несмотря на использование современных отопительных систем и принципов управления воздушными потоками, температура в непосредственной близости от поверхности пола существенно ниже нормируемой в рабочей зоне. Такая температурная обстановка определяет значительный градиент температуры в данной зоне и во всем объеме помещения, что снижает эффективность систем обеспечения микроклимата и энергосберегающих мероприятий. Представлены данные численного эксперимента по исследованию теплообмена через неутепленные полы на грунте и при наличии утепляющего слоя в производственном помещении с источниками тепловыделений.

Ключевые слова: численное моделирование, модель турбулентности, источник тепловыделений, микроклимат, теплообмен, утепленные и неутепленные полы.

In production premises, traditionally non-insulated floors laid on the ground are used. As a result, despite the use of modern heating systems and principles of airflow control, the temperature in the immediate vicinity of the floor surface is much lower than the norm in the work area. This temperature situation determines a significant temperature gradient in this zone and throughout the premises, which reduces the effectiveness of microclimate provision systems and energy-saving measures. The article presents the data of numerical experiment on the study of heat transfer through non-insulated floors laid on the ground and in the presence of an insulating layer in a production premise with sources of heat emission.

Keywords: numerical simulation, turbulence model, source of heat emission, microclimate, heat transfer, insulated and non-insulated floors.

Одним из основных этапов современных исследований процессов тепломассообмена и гидрогазодинамики является численный эксперимент. При изучении тепловоздушных процессов в вентилируемых помещениях широко применяются такие программные продукты, как ANSYS, Star-CCM+, Star-CD и ряд других. Численное моделирование позволяет получить подробные поля распределения различных физиче-

ских параметров в твердых телах, жидких и газообразных средах. Численному моделированию процессов тепловоздухообмена в помещениях различного назначения посвящено значительное количество работ, например [1–4]. Проанализировано влияние на состояние воздушной среды помещений многих факторов, среди которых можно отметить характеристики наружного климата, архитектурно-строительные

особенности объекта, теплотехнические показатели ограждающих конструкций, размещение технологического оборудования. Известно, что состояние воздушной среды в рабочей или обслуживаемой зоне помещений общественных и производственных зданий во многом определяется особенностями теплообмена через наружные строительные конструкции.

При нахождении трансмиссионных потерь теплоты, определяющих нагрузку на систему отопления, учитываются в первую очередь требования нормативных документов^{1,2} в зависимости от назначения помещения.

Потери теплоты через пол в общей отопительной нагрузке составляют не более 20 %, однако необходимо учитывать существенное влияние температуры поверхности пола на формирование циркуляционных воздушных потоков в помещении и, как следствие, на тепловое состояние воздушной среды в рабочей зоне практически любых производственных помещений. Особенно это важно учитывать в производственных помещениях значительного объема при наличии источников теплоты и использовании систем воздушного отопления разного вида. К числу таких помещений относятся машинные залы компрессорных станций с газотурбинными установками (ГТУ), размещенными на площадках выше уровня пола. На рис. 1 приведены план и разрез фрагмента машинного зала с ГТУ и газоходами, которые имеют соизмеримые с размерами помещения габариты и являются мощными источниками тепловыделений.

Особенности размещения технологического оборудования выше уровня пола способствуют формированию в рабочей зоне нижней части помещения низкой температуры воздуха [2], не соответствующей требованиям нормативных документов³. Применение способа управления тепловыми струями, как отмечено в работе [5], позволяет обеспечить соответствующие нормируемым значениям средние температуры в ра-

¹ СП 60.13330.2016. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. М.: Минстрой России, 2017. 69 с.

² СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты. М.: Мин-регион России, 2004. 141 с.

³ СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: Санитарные правила и нормы. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. 20 с.

бочей зоне нижней части машинного зала. Из-за наличия неутепленного пола в этой рабочей зоне имеет место существенный градиент температуры, при этом температура воздуха вблизи пола существенно ниже нормируемых значений.

В практике инженерного проектирования систем отопления, принимая во внимание природную неоднородность температуры грунта, для расчета потерь теплоты через пол на грунте используется метод зонирования. Однако такой

Рис. 1. Разрез (а) и расчетный план (б) модуля машинного зала: 1 — газотурбинная установка; 2 — газопровод; 3 — приточные устройства; 4 — инфильтрационные отверстия

метод не позволяет получить поля температуры в конструкции пола и окружающего воздуха.

В настоящее время при изучении практически любых физических процессов, включая тепло-газодинамические, используется численный эксперимент с использованием различных программных комплексов и индивидуальных программ [6–11], например ANSYS, Star-CCM+, Star-CD и ряда других. В предлагаемой работе представлены данные численного моделирования с использованием программного комплекса Star-CCM+. В качестве модели турбулентности принята одна из наиболее распространенных модель турбулентности « $k - \epsilon$ » (модификация *Kato Launder*). Адекватность применения этой модели при изучении теплообменных процессов для рассматриваемых объектов доказана в работе [6].

В основе математического моделирования турбулентных течений любой среды, как известно, лежат численное решение системы основных дифференциальных уравнений неразрывности, а также (уравнения Навье — Стокса) сохранения импульса и энергии. Для помещений с источниками теплоты данная система дифференциальных уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} &= 0; \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \\ &+ g\beta(T - T_0) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{u'_i u'_j} \right); \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{T}}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{T' u'_j} \right), \quad (1) \end{aligned}$$

где t — время; ρ — плотность; $\bar{u}_j$ — компоненты вектора осредненной скорости по осям координат; ν — коэффициент кинематической вязкости; $(T - T_0)$ — отклонение фактической температуры от фиксированной средней; $\beta = T^{-1}$ — коэффициент теплового расширения воздуха; $\bar{P}, \bar{T}$ — осредненные давление и температура; $\overline{u'_i u'_j} = \frac{\tau_{ij}}{\rho}$; τ_{ij} — турбулентные напряжения Рейнольдса; $\rho A_p \overline{u'_j T'}$ — дополнительный тепловой поток; u'_i, u'_j, T' — локальные пульсации скорости и температуры потока.

Для дискретизации использован метод конечных объемов на структурированной неортогональной несмещенной сетке, сгущающейся вблизи твердых поверхностей, с использованием закона гиперболического тангенса или алгоритма Винокура (Marceel Vinokur). Для аппроксимации членов уравнений системы (1), описывающих конвективный перенос, использована противопоточная схема первого порядка точности. Для коррекции давления применен алгоритм SIMPLEC. Граничные условия заданы следующим образом:

- для скоростей воздуха на твердых стенках — условия «прилипания»;
- плотности теплового потока на поверхностях газотурбинной установки и газохода, наружных ограждающих конструкций;
- средняя температура грунта +5 °С;
- температура и скорость движения воздуха в приточных отверстиях.

Исследованиям теплообмена в конструкции пола посвящены работы [12–14].

Неутепленный пол состоит из слоя бетона толщиной 150 мм. Утепленный пол — из слоя бетона толщиной 150 мм и теплоизоляционного слоя толщиной 150 мм с коэффициентом теплопроводности 0,07 Вт/(м · К). (Толщина бетона и теплоизоляционного слоя приняты равными.)

На рис. 2 представлены поля температуры в конструкции неутепленного пола в горизонтальных плоскостях на отметке –0,001 м (рис. 2, а) и воздуха на отметке +0,020 м (рис. 2, б), а также утепленного пола, соответственно, в тех же плоскостях.

Сечения $X = 0$ м и $X = 15$ м соответствуют внутренней поверхности наружных стен. Сплошными линиями на рис. 2, а и б выделены зоны под газотурбинной установкой и газоходом, а также под приточными устройствами. Результаты численного моделирования показывают, что на глубине 0,001 м в конструкции неутепленного пола — практически равномерное температурное поле. При этом температура в данной плоскости соответствует заданной температуре грунта порядка 5–6 °С, только вблизи наружных стен снижается до 0 °С. При рассмотрении полей температуры воздуха вблизи внутренней поверхности неутепленного пола, например на уровне +0,020 м, наблюдается неравномерное

Рис. 2. Распределение температуры в конструкции неутепленного пола на отметке $-0,001$ м (а) и воздуха на отметке $+0,020$ м (б) и утепленного пола на отметке $-0,001$ м (в) и воздуха на отметке $+0,020$ м (з)

распределение температуры. Диапазон изменения температуры составляет от 0 до 20°C , что связано с особенностями размещения технологических источников теплоты. Из этих данных видно, что, несмотря на применение струйной тепловой защиты, температура воздуха вблизи пола существенно ниже нормируемой. При использовании утепляющего слоя температура поверхности пола изменяется от 6 до 22°C , что практически совпадает с распределением температуры воздуха в непосредственной близости от поверхности пола. Такое состояние воздушной среды соответствует требованиям нормативных документов⁴.

На рис. 3 приведены данные о распределении температуры пола и воздуха по оси Y в точках с координатами $X = 3,0$ м, $Z = 3,0$ м и $X = 13,0$ м, $Z = 3,0$ м при наличии неутепленного пола (а, б) и

утепленного пола (в, г). Результаты исследований для неутепленного пола отражают идентичность изменения температуры, при этом наиболее интенсивное изменение температуры происходит на границе «твердая поверхность — воздух». Вблизи наружной стены с координатой $X = 0$ градиент температуры меньше, чем у противоположной стены. Это можно объяснить тем, что наружная стена с координатой $X = 0$ имеет более значительные потери теплоты из-за наличия ворот и технологических отверстий. Наличие нагретых поверхностей газотурбинной установки обуславливает более значительный градиент температуры в непосредственной близости от неутепленного пола.

Что касается распределения температуры пола и воздуха по оси Y в точках с координатами $X = 3,0$ м, $Z = 3,0$ м и $X = 13,0$ м, $Z = 3,0$ м, то при наличии утепленного пола (см. рис. 3, в, г) в данном случае за счет теплоизоляционных свойств утеплителя практически отсутствует резкое

⁴ СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: Санитарные правила и нормы. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. 20 с.

Рис. 3. Распределение температуры для неутепленного пола в точке с координатами $X = 3,0$ м, $Z = 3,0$ м (а) и $X = 13,0$ м, $Z = 3,0$ м (б) и утепленного пола в точке с координатами $X = 3,0$ м, $Z = 3,0$ м (в) и $X = 13,0$ м, $Z = 3,0$ м (г)

изменение температуры на границе «твердая поверхность — воздух», уменьшается градиент температуры по высоте ограждающей конструкции и прилегающего слоя воздуха. Обращает на себя внимание практически линейная зависимость изменения температуры воздуха по высоте помещения от уровня пола (отметка 0,000 м) до отметки 0,500 м. На рис. 3, в в окрестностях отметки $-0,100$ м имеет место «излом» кривой изменения температуры по высоте рассматриваемого диапазона. Это связано с влиянием конвективного теплообмена на поверхности пола за счет потоков воздуха через неплотности дверных просмов. Достаточно высокая температура воздуха ($+22...24$ °C) на отметке 0,500 м вблизи ворот формируется за счет работы системы струйной защиты [5]. При этом градиент температуры достигает 9 °C/м в точке с координатами $X = 13,0$ м, $Z = 3,0$ м.

Выводы. Результаты численного моделирования процессов теплообмена в помещении с источниками тепловыделений при наличии неутепленного и утепленного пола показывают, что использование программных комплексов позволяет оценить влияние теплоотдающих поверхностей и пространственного распределения температуры воздуха в помещении на процессы теплообмена. Результаты исследований в дальнейшем могут быть использованы в расчетах потерь теплоты через неутепленные и утепленные полы на грунте, при выборе материала и толщины утепляющего слоя, а также при проектировании энергоэффективных систем отопления.

Библиографический список

1. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Денисихина Д. М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2013. 192 с.
2. Позин Г. М., Уляшева В. М. Воздушно-тепловой режим помещений с источниками тепловыделений // Приволжский журнал. 2013. № 1. С. 202–207.
3. Полосин И. И., Дерепасов А. В. Моделирование вентиляционных процессов в производственных помещениях с проемами в междуэтажных перекрытиях // Научный журнал строительства и архитектуры. 2011. № 2. С. 43–51.
4. Zhu Z., Yang H., Chen T. Numerical study of turbulent heat and fluid flow in a straight square duct at higher Reynolds numbers // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53, № 1–3. Pp. 356–364.
5. Позин Г. М., Уляшева В. М. Численное моделирование тепловоздушных процессов в помещениях с источниками теплоты // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 1 (22). С. 147–151.
6. Позин Г. М., Уляшева В. М., Киборт И. Д. К вопросу применения моделей турбулентности при численном моделировании вентиляционных процессов // Известия вузов. Строительство. 2013. № 10. С. 49–56.
7. Liu Q. A., Linden P. F. The fluid dynamics of an underfloor air distribution system // Journal of Fluid Mechanics. 2006. Vol. 554. Pp. 323–341.
8. Chen F., Yu S. C. M., Lai A. C. K. 2006. Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model // Atmospheric Environment. 2006. Vol. 40, Issue 2. Pp. 357–367.
9. Yang H., Chen T., Zhu Z. Numerical study of forced turbulent heat convection in a straight square duct // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 52, Issue 13–14. Pp. 3128–3136.

10. Yang H., Zhu Z. Numerical study of three-dimensional turbulent natural convection in a differentially heated air-filled tall cavity // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 35, Issue 5. Pp. 606–612.
11. Oztop H. F., Abu-Nada E., Varol Y., Chamkha A. Natural convection in wavy enclosures with volumetric heat sources // *International Journal of Thermal Sciences*. 2011. Vol. 50, № 4. Pp. 502–514.
12. Lis A., Ujma A. Building Energy Efficiency Improvement after Thermomodernization // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2013. № 756: Теорія і практика будівництва. С. 153–160. URL: <http://ena.lp.edu.ua/handle/ntb/20981>.
13. Andolsun S., Culp C. H., Haberl J. Energyplus Vs DOE-2: The Effect of Ground Coupling on Heating and Cooking Energy Consumption of a Slab-on-Grade Code House in a Cold Climate // *Texas A&M University, College Station, TX, USA*. Aug. 2010. URL: <http://hdl.handle.net/1969.1/93374>
14. Young-Sun Jeong & Hae-Kwon Jung. Thermal Performance Analysis of Reinforced Concrete Floor Structure with Radiant Floor Heating System in Apartment Housing // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 2015. Article ID 367632, 7 pages. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/367632>

References

1. Grimitlin A. M., Datsyuk T. A., Denisikhina D. M. *Matematicheskoe modelirovanie v projektirovanii sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya* [Mathematical modeling in design of ventilation and conditioning systems]. St. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2013, 192 p.
2. Pozin G. M., Ulyasheva V. M. *Vozdushno-teplovoy rezhim pomeshcheniy s istochnikami teplovyydeniy* [Air and thermal regime of the premises with sources of heat emission]. *Privolzhskiy zhurnal – Volga Journal*, 2013, no. 1, pp. 202–207.
3. Polosin I. I., Derepasov A. V. *Modelirovanie ventilyatsionnykh protsessov v proizvodstvennykh pomeshcheniyakh s proemami v mezhduehtazhnykh perekrytiyakh* [Modeling of ventilation processes in industrial premises with openings in inter-floor coverings]. *Nauchnyy zhurnal stroitelstva i arkhitektury – Scientific journal of civil engineering and architecture*, 2011, no. 2, pp. 43–51.
4. Zhu Z., Yang H., Chen T. Numerical study of turbulent heat and fluid flow in a straight square duct at

higher Reynolds numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, no. 1–3, pp. 356–364.

5. Pozin G. M., Ulyasheva V. M. *Chislennoe modelirovanie teplovozdushnykh protsessov v pomeshcheniyakh s istochnikami teploty* [Numerical modeling of hot-air processes in rooms with heat emission sources]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2009, no. 1 (22), pp. 147–151.

6. Pozin G. M., Ulyasheva V. M., Kibort I. D. *K voprosu primeneniya modeley turbulentnosti pri chislennom modelirovanii ventilyatsionnykh protsessov* [On the application of turbulence models to numerical simulation of ventilation processes]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo – News of higher schools. Construction*, 2013, no. 10, pp. 49–56.

7. Liu Q. A., Linden P. F. The fluid dynamics of an under-floor air distribution system. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, vol. 554, pp. 323–341.

8. Chen F., Yu S. C. M., Lai A. C. K. 2006. Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model. *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40, no. 2, pp. 357–367.

9. Yang H., Chen T., Zhu Z. Numerical study of forced turbulent heat convection in a straight square duct. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, no. 13–14, pp. 3128–3136.

10. Yang H., Zhu Z. Numerical study of three-dimensional turbulent natural convection in a differentially heated air-filled tall cavity. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 35, no. 5, pp. 606–612.

11. Oztop H. F., Abu-Nada E., Varol Y., Chamkha A. Natural convection in wavy enclosures with volumetric heat sources. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, vol. 50, no. 4, pp. 502–514.

12. Lis A., Ujma A. Building Energy Efficiency Improvement after Thermomodernization. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, 2013, no. 756. Теорія і практика будівництва, pp. 153–160. Available at: <http://ena.lp.edu.ua/handle/ntb/20981>

13. Andolsun S., Culp C. H., Haberl J. Energyplus Vs DOE-2. *The Effect of Ground Coupling on Heating and Cooking Energy Consumption of a Slab-on-Grade Code House in a Cold Climate*. Texas A&M University, College Station, TX, USA, Aug. 2010. Available at: <http://hdl.handle.net/1969.1/93374>

14. Young-Sun Jeong & Hae-Kwon Jung. Thermal Performance Analysis of Reinforced Concrete Floor Structure with Radiant Floor Heating System in Apartment Housing. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 2015. Article ID 367632, 7 p. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/367632>