

Экспериментальные исследования и математическое моделирование тепловых процессов на участке дуговой сталеплавильной печи

В.В. Масленский

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: В статье приведены результаты экспериментальных исследований параметров микроклимата (температуры, интенсивности теплового облучения) на участке дуговой сталеплавильной печи, на базе которых подтверждена адекватность математических моделей теплопереноса, реализованных в программном комплексе ANSYS. Применение данных математических моделей даст возможность предварительно оценивать терморрадиационную обстановку на проектируемых или реконструируемых объектах, а также позволит заранее подобрать эффективные средства тепловой защиты.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, математические модели, экспериментальные исследования, теплоперенос, температура, интенсивность теплового облучения.

Введение

Основными источниками теплового излучения на участке дуговой сталеплавильной печи (далее ДСП) выступают ее конструктивные элементы, а также находящееся в непосредственной близости от нее оборудование.

Наибольшая температура излучения, согласно технологическому процессу, наблюдается у рабочего окна печи, когда оно открывается на 28 минут в процессе удаления шлака ($T_{A1} = 1953$ К). В закрытом состоянии рабочее окно охлаждается благодаря теплоотводящим экранам и имеет температуру излучения $T_{A1}' = 573$ К.

Другим источником теплового излучения является газоход печи, а именно его регулируемый разрыв газового потока (300-400 мм), температура излучения которого составляет $T_{A2} = 1473$ К.

Наконец, открытое пламя, образующееся при раскрытии свода печи в процессе завалки металлургическим краном, характеризуется температурой излучения, аналогичной наблюдающейся у открытого рабочего окна ($T_{A1} = 1953$ К). В целом же температура поверхностей печи, охлаждаемых теплоотводящими экранами, составляет 309 К [1, 2].

Результаты специальной оценки условий труда на участке

Данные экспериментальных исследований на участке ДСП базировались на результатах специальной оценки условий труда, иллюстрирующих возникающие тепловые явления как на открытой территории (рабочее место сталевара, подручного сталевара), так и в закрытых помещениях (рабочие места оператора главного пульта управления (далее ГПУ) и машиниста металлургического крана (далее МК)) (таблица №1). Для получения величины исследуемых параметров производственного микроклимата, а именно - температуры и интенсивности теплового облучения, применялся измеритель микроклимата «ЭкоТерма-1» (на базе прибора «ЭКОФИЗИКА-110А») [3].

Таблица №1

Результаты измерений параметров микроклимата

№ п/п	Физический фактор, единицы измерения	Результаты измерений	Величина допустимого уровня
Рабочие места:			
1	Сталевар, подручный сталевара		
	Температура воздуха, °С	40	15-26
	Интенсивность теплового облучения, Вт/м ²	1168,3	140
2	Оператор ГПУ		
	Температура воздуха, °С	25	23-25
	Температура поверхностей, °С	26	22-26
3	Машинист МК		
	Температура воздуха, °С	25	23-25
	Температура поверхностей, °С	26	22-26

Из результатов измерений следует, что на открытых территориях участка ДСП наблюдается значительное отклонение параметров микроклимата от допустимого уровня (температуры воздуха – в 1,54 раза, интенсивности теплового облучения – в 6,48 раза), в то время как в закрытых помещениях температура воздуха и поверхностей хоть и попадают в

диапазон допустимого уровня, но находятся на его верхней границе. Это объясняется работой кондиционеров, которую можно охарактеризовать как предельную, вследствие неблагоприятной терморadiационной обстановки на открытой территории вблизи ДСП.

Результаты замеров температур на поверхностях оборудования вблизи источников излучения

Были произведены измерения фактических температур поверхностей оборудования, расположенного на некотором расстоянии от источников излучения на участке ДСП, а именно, конструктивных элементов ДСП – рабочего окна и регулируемого разрыва газового потока газохода, при помощи пирометра TIR-1653.

В качестве объектов для замеров были выбраны:

- стенд для торкретирования печи, расположенный на расстоянии 3,5 м от рабочего окна ДСП и 5,9 м от ее газохода;
- шумозащитный экран, расположенный в 10 м от рабочего окна ДСП и 13,8 м от ее газохода;
- наружная стенка ГПУ, расположенная в 16 м от рабочего окна ДСП и 21,2 м от ее газохода.

Проведенные замеры были осуществлены на уровне 1,5 м от пола в соответствии с требованиями к контролю температур. Температура воздуха в ЭСПЦ составляла 14 °С [3, 4].

Результаты замеров представлены в таблице №2.

Как следует из результатов замеров, требования санитарно-гигиенических нормативов по температурам поверхностей соблюдены только на наружной стенке кабины ГПУ. Остальные объекты будут являться дополнительными источниками инфракрасного излучения на участке, что

может отражаться на выборе и дальнейшей работе проектируемых систем кондиционирования закрытых помещений, в том числе и кабин МК.

Таблица №2

Результаты измерения фактических температур поверхностей оборудования на участке ДСП

	Оборудование		
	стенд для торкретирования печи	шумозащитный экран	наружная стенка ГПУ
Температура, °С	75	63	40

Подтверждение адекватности математических моделей теплопереноса по результатам измерений

Исходными данными для проверки математических моделей, реализуемых в программном комплексе ANSYS, послужили геометрические модели оборудования участка ДСП, температура поверхностей которого была измерена в результате проведенных экспериментальных исследований [5 – 7]. В качестве граничных условий задавалась температура (1953 К) в рабочем окне ДСП-150 площадью 0,72 м². Математические модели теплопереноса представлены моделью дискретных ординат (ДО), наиболее точно описывающей перенос радиационного тепла в пространстве, и моделью турбулентности Shear Stress Transport (SST) [8 – 10]. Результаты моделирования температуры наружных поверхностей оборудования участка ДСП представлены на рисунке 1.

Кроме того, были смоделированы температура на внутренних поверхностях оборудования участка ДСП, расположенного на уровне 24 м, и интенсивность теплового облучения работника (рисунок 2). Для этого помимо температуры рабочего окна печи задавался тепловой поток (783638 Вт/м²) и коэффициенты теплопередачи, включающие в себя толщину и материал стенок кабин.

В таблице №3 показаны результаты расчета относительной погрешности температур поверхностей оборудования на участке ДСП, смоделированных в ANSYS и полученных экспериментально. Таким образом, по результатам компьютерного моделирования можно утверждать об адекватности предложенных моделей радиационной и конвективной теплопередачи, а также теплопроводности через стенку.

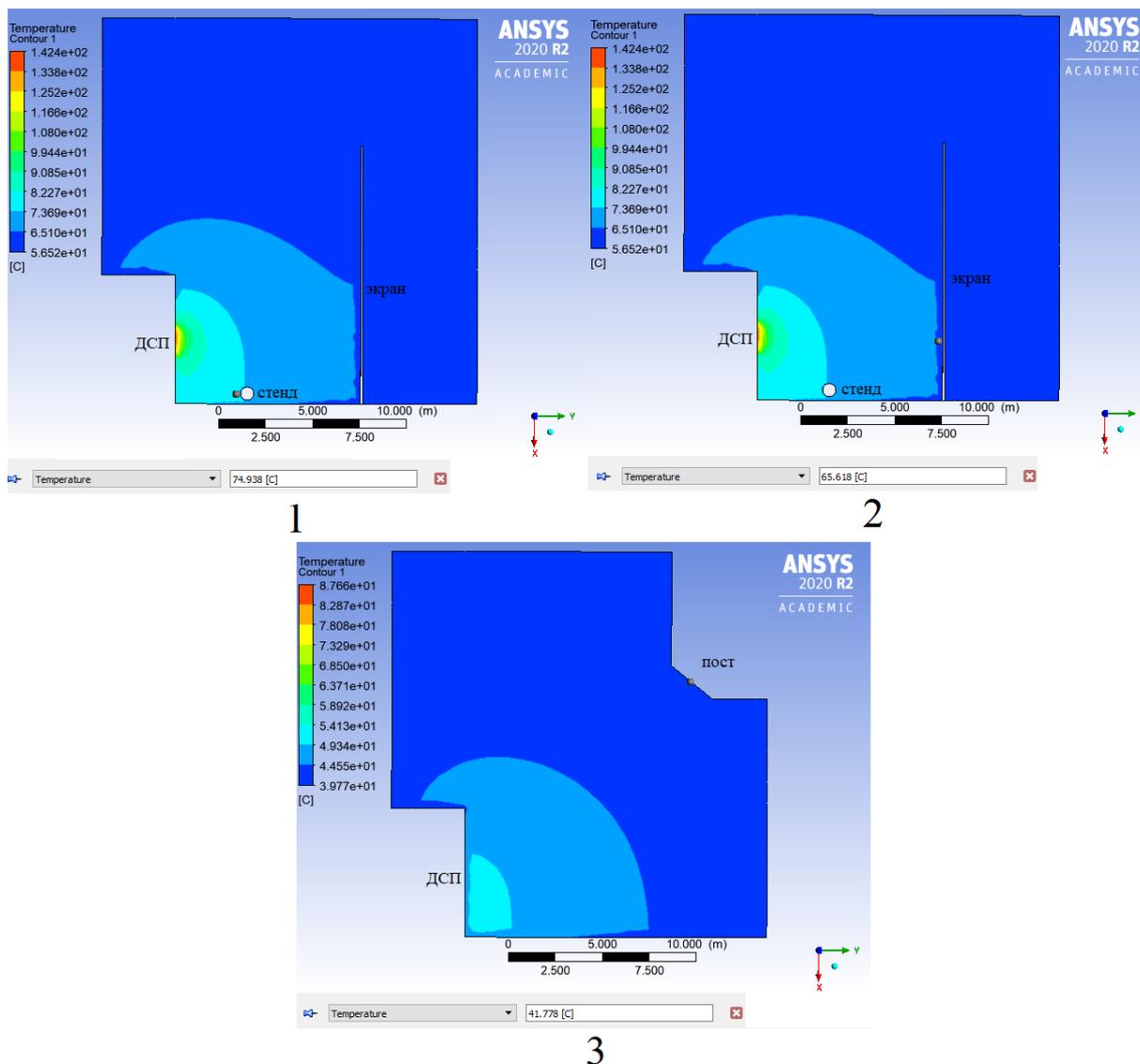


Рисунок 1 – Результаты моделирования температуры на наружных поверхностях оборудования участка ДСП: 1 – стенда для торкретирования; 2 – шумозащитного экрана печи; 3 – ГПУ печи

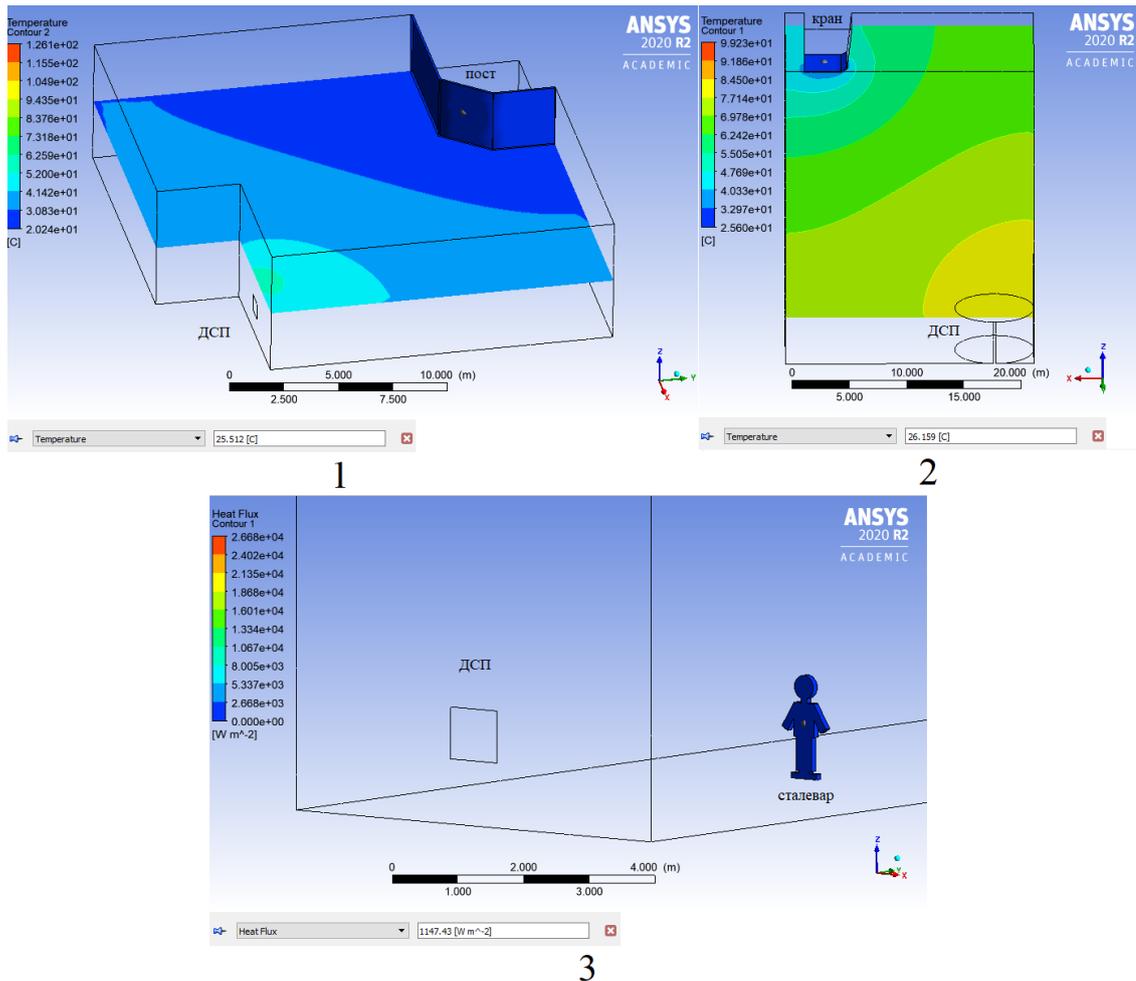


Рисунок 2 – Результаты моделирования температуры на внутренних поверхностях оборудования и теплового облучения работников участка ДСП:

1 – кабины ГПУ печи; 2 – кабины МК; 3 – сталевара

Таблица №3

Значения относительной погрешности смоделированных в ANSYS и полученных экспериментально температур поверхностей оборудования на участке ДСП

Измерительная точка	Экспериментальное значение		Модельный расчёт в ANSYS		Относительная погрешность, %
	°C	Вт/м ²	°C	Вт/м ²	
1	2	3	4	5	6
стенд для торкретирования печи	75	-	74,938	-	0,08

1	2	3	4	5	6
шумозащитный экран	63	-	65,618	-	4,15
наружная стенка ГПУ	40	-	41,778	-	4,45
внутренняя стенка ГПУ	26	-	25,512	-	1,88
внутренняя стенка кабины МК	26	-	26,159	-	0,61
сталевар	-	1186,3	-	1147,43	3,28

Литература

1. Месхи Б.Ч., Булыгин Ю.И., Масленский В.В., Лоскутникова И.Н. Оценка терморadiационного режима рабочего места крановщика с целью обоснованного выбора климатической системы кабины металлургического крана // Безопасность труда в промышленности, 2021, №2, С. 7–14.

2. Bulygin Y.I., Shchekina E.V., Maslensky V.V., Popov D.S., and Tryukhan A.V. Modeling of thermal radiation mode of "hot" shops in the software system ANSYS FluidFlow (CFX) and justification of thermal protection methods of the heat treaters // AIP Conference Proceedings, 2019, №2188, 050033, doi: 10.1063/1.5138460.

3. Bulygin Yu.I., Azimova N.N., Kuptsova I.S., Popov D.S., and Maslensky V.V. Calculation of working spaces irradiation in the steel-melting plant of PJSC «TAGMET» at its reconstruction by the method of construction of epyures of irradiation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, №224, 012052, doi:10.1088/1755-1315/224/1/012052.

4. Лазаренков А.М. Исследование условий труда работающих в термических цехах // Литье и металлургия, 2020, №1, С. 125–128.

5. Ковшевний А.А., Лисиенко В.Г. Математическое моделирование объекта управления для систем контроля температуры // Инженерный вестник Дона, 2020, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6581.

6. Калганов А.А., Лисиенко В.Г., Калганова А.П. Методика моделирования тепловых процессов для радиоэлектронной аппаратуры // Инженерный вестник Дона, 2020, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2020/6500.

7. Федорова И.В. Тепловой и влажностный режимы объекта историко-архитектурного наследия в Санкт-Петербурге // Инженерный вестник Дона, 2021, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6826.

8. Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии, М.: ИЛ, 1953, 431 с.

9. Садыков А.В. К расчету лучистых тепловых потоков в прямоугольных областях методом дискретных ординат // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2016, №3-4, С. 13–21.

10. Шигапов А.Б. Радиационный теплообмен в топках котлов // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2014, №1-2, С. 27–36.

References

1. Meskhi V.Ch., Bulygin Yu.I., Maslensky V.V., Loskutnikova I.N. Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2021. №2. pp. 7–14.

2. Bulygin Y.I., Shchekina E.V., Maslensky V.V., Popov D.S., and Tryukhan A.V. Modeling of thermal radiation mode of "hot" shops in the software system ANSYS FluidFlow (CFX) and justification of thermal protection methods of the heat treaters. AIP Conference Proceedings. 2019. №2188. 050033. doi: 10.1063/1.5138460.

3. Bulygin Yu.I., Azimova N.N., Kuptsova I.S., Popov D.S., and Maslensky V.V. Calculation of working spaces irradiation in the steel-melting plant of PJSC «TAGMET» at its reconstruction by the method of construction of epyures of irradiation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. №224. 012052. doi: 10.1088/1755-1315/224/1/012052.

4. Lazarenkov A.M. Lityo i metallurgiya. 2020. №1. pp. 125–128.



5. Kovshevnyy A.A., Lisiyenko V.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6581.
6. Kalganov A.A., Lisiyenko V.G., Kalganova A.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2020/6500.
7. Fedorova I.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6826.
8. Chandrasekar S. Perenos luchistoy energii [Radiative Transfer]. M.: IL. 1953. 431 p.
9. Sadykov A.V. Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2016. №3-4. pp. 13–21.
10. Shigapov A.B. Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. 2014. №1-2. pp. 27–36.