

Выбор структуры и параметров газокапельного потока в блоке охлаждения газа, полученного при термической обработке отходов

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Проведено численное моделирование физических процессов газокапельного потока в блоке охлаждения генераторного газа установки утилизации отходов. Представлены три варианта способов и режимов подачи воды форсунками в газоотводящую трубу. Результаты параметров газокапельного потока позволяют сделать вывод об экологической эффективности каждого исследуемого варианта.

Ключевые слова: отходы, утилизация, блок охлаждения, экологическая безопасность, численное моделирование.

Введение

Утилизация твердых бытовых и опасных отходов с применением плазменной газификации предотвращает образование смол и диоксинов [1]. Однако при постепенном понижении температуры газа, полученного при газификации отходов, создаются условия для вторичного формирования этих высокотоксичных веществ. Это происходит при выходе дымовых газов из печи при температурах, когда процессы разрушения диоксинов протекают очень медленно.

Для обеспечения экологически безопасной утилизации твердых бытовых и опасных отходов без образования диоксинов эффективным является использование быстрого охлаждения образующегося генераторного газа [2, 3].

Для быстрого преодоления диапазона опасных температур при выходе газового потока резкое охлаждение горячих дымовых газов достигается за счет впрыска в газовый поток воды, диспергированной центробежными форсунками. Таким образом, для обеспечения экологической безопасности технологического процесса утилизации необходимы рациональная организация пространственной структуры водяного аэрозоля и выработка на этой основе эффективных конструктивных решений.

1. Постановка задачи исследования

Предлагается организовывать процесс охлаждения генераторного газа впрыском воды центробежными форсунками в газоотводящую трубу (рис. 1). Физико-математическая постановка данной задачи, методы численного интегрирования уравнений газовой дисперсной фазы, обеспечение устойчивости, сходимости и точности численного решения были предложены в работе [4].

Наибольшая эффективность предложенной водяной завесы достигается, если конусы распыла жидкости будут перекрывать весь объем в блоке охлаждения (рис. 2), не допуская прохода между конусами распыла даже части потока горячего газа. Учитывая, что диспергированная жидкость представляет собой мелкодисперсную структуру, а газовый поток имеет высокую температуру, испарение капель может наблюдаться еще до охлаждения газового потока. Таким образом, следует создать такую структуру и параметры газокапельного потока, при которых водяная завеса будет полностью покрывать горячий газовый поток, охлаждая его до требуемой температуры, исключая скопление жидкости в блоке охлаждения.

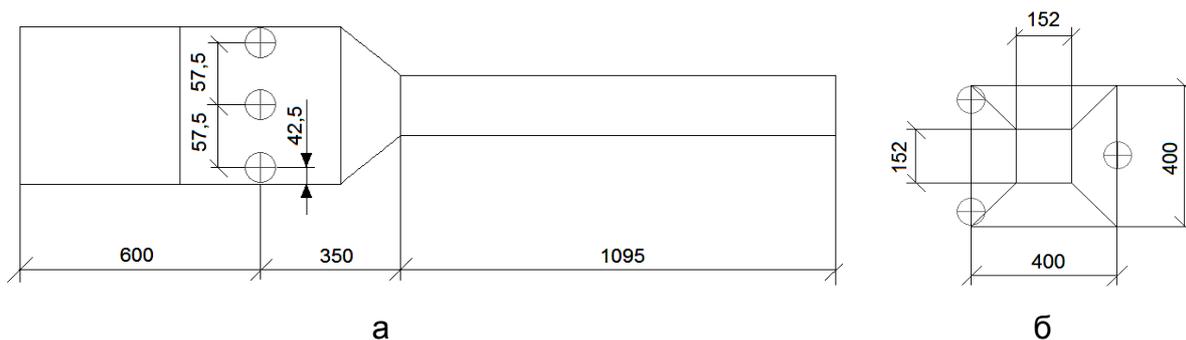


Рис. 1. Схема расположения форсунок в блоке охлаждения:
а – вид спереди; б – вид справа

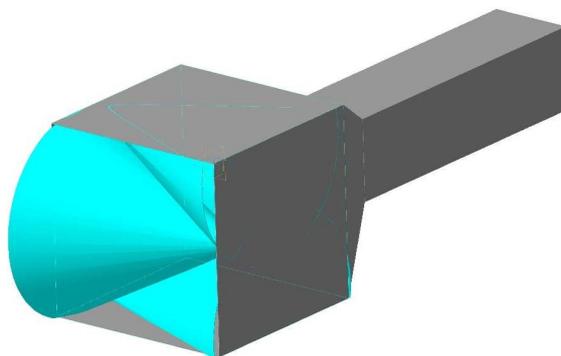


Рис. 2. Схема создания водяной завесы в газоотводящей трубе

Одним из показателей эффективности работы системы охлаждения служат значения параметров подачи воды форсунками, обеспечивающие дисперсность распыливания воды и скорость ее истечения из сопла. Задачей исследования является подбор наиболее удовлетворительных параметров подачи воды.

2. Материалы и результаты исследований

Численное моделирование физических процессов позволяет снизить временные и экономические затраты на исследование и разработку, детального анализа сложных процессов в газодисперсных средах. Использование численного моделирования физических процессов газочапельного потока в блоке охлаждения генераторного газа установки утилизации твердых бытовых и опасных отходов также является целесообразным, как и для других оросительных систем охлаждения. Такой подход позволяет получить целостную картину распределения полей температур, массовой доли водяного пара в контрольных сечениях газоотводящей трубы и других параметров потока.

При проведении исследования рассмотрены несколько вариантов способов и режимов подачи воды форсунками в газоотводящую трубу. Численные значения этих параметров определены методами, предложенными авторами в работе [4]. При этом были учтены:

- скорость истечения жидкости из сопла форсунки;
- массовый расход воды через форсунку;
- площадь поперечного сечения сопла;

- коэффициент расхода и угол конуса распыла;
- дисперсность распыления воды.

Результаты численных расчетов представлены в табл. 1 для трех вариантов подачи воды (1 – исходный (см. рис. 1), 2, 3 – возможные).

Схематично расчетная область численного эксперимента представлена на рис. 3. Расположение форсунок отмечено крестом, цифрами 1, 2, 3, 4 – указаны номера контрольных сечений. Граница выходного патрубка совпадает с сечением 4.

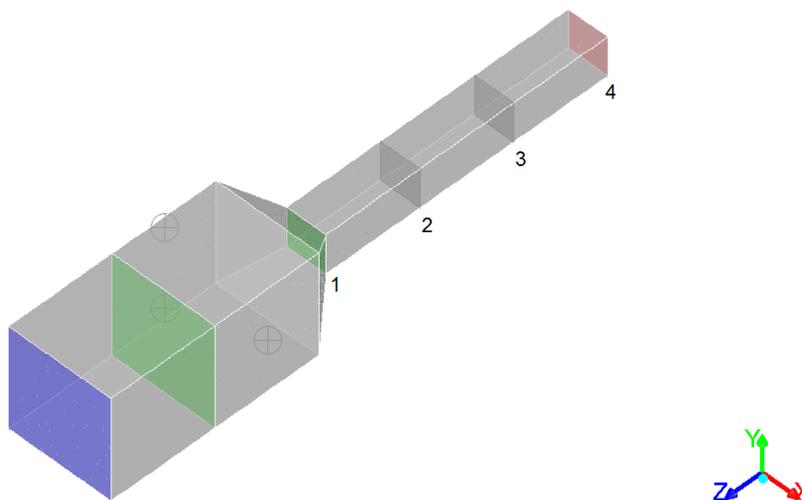


Рис. 3. Расчетная область газоотводящей трубы (изометрия)

Таблица 1. Численные значения параметров подачи воды форсунками

Наименование параметра	Номер варианта		
	1	2	3
d_0 , м	0,0006	0,0009	0,0011
$A_{\phi} / D_s d_0$	0,75	1,3	1
C_D	0,43	0,56	0,50
β , град	66	50	57
v , м/с	10	3	3
D_p , Па	48228	5650	3189
Re_{θ}	3858	2257	1957
d_{\min} , м	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$55 \cdot 10^{-6}$	$202 \cdot 10^{-6}$
\bar{d} , м	$16,6 \cdot 10^{-6}$	$144 \cdot 10^{-6}$	$514 \cdot 10^{-6}$
d_{\max} , м	$25 \cdot 10^{-6}$	$234 \cdot 10^{-6}$	$802 \cdot 10^{-6}$
n	3,77	3,99	3,6

На основе подхода, предложенного авторами в работе [4], были проведены численные экспериментальные исследования. Результаты численного моделирования охлаждения генераторного газа впрыском воды центробежными форсунками в газоотводящую трубу для трех вариантов подачи воды показаны на рис. 4 – 12 и сведены в табл. 2.

Таблица 2. Значения параметров в характерных поперечных сечениях газоотводящей трубы для трех вариантов подачи воды

Наименование параметра	Номер сечения			
	1	2	3	4
Вариант № 1				
z, м	-0,55	-0,912	-1,274	-1,6365
z, калибры	0	2,4	4,8	7,2
t _{min} , °C	31,3	188,7	275,3	311,8
t _{cp} , °C	408,6	364,7	357,6	355,8
t _{max} , °C	951,6	592,8	482,3	424,1
γ _T	0,8892	0,9422	0,9649	0,978
g _{H₂O} min	0,041	0,116	0,143	0,158
g _{H₂O} cp	0,1666	0,1756	0,1769	0,1774
g _{H₂O} max	0,282	0,227	0,2	0,19
γ _{H₂O}	0,8804	0,9426	0,9653	0,9781
Вариант № 2				
z, м	-0,55	-0,912	-1,274	-1,6365
z, калибры	0	2,4	4,8	7,2
t _{min} , °C	257	337,7	347,7	350,4
t _{cp} , °C	356,9	354,3	354,41	354,42
t _{max} , °C	414,1	363,2	359,6	358
γ _T	0,9795	0,9955	0,9973	0,9983
g _{H₂O} min	0,162	0,175	0,176	0,177
g _{H₂O} cp	0,17705	0,17766	0,17764	0,17763
g _{H₂O} max	0,2057	0,1822	0,1795	0,1787
γ _{H₂O}	0,9799	0,9957	0,9974	0,9984
Вариант № 3				
z, м	-0,55	-0,912	-1,274	-1,6365
z, калибры	0	2,4	4,8	7,2
t _{min} , °C	285,1	330,2	345,7	354,1
t _{cp} , °C	418,2	393,3	382	375
t _{max} , °C	616,5	467,5	422,4	396,6
γ _T	0,9501	0,9711	0,9835	0,9904
g _{H₂O} min	0,112	0,147	0,159	0,166
g _{H₂O} cp	0,1604	0,1668	0,1698	0,1718
g _{H₂O} max	0,2	0,184	0,18	0,177
γ _{H₂O}	0,9443	0,9693	0,9829	0,9903

Анализ результатов численного моделирования.

В варианте № 1 (рис. 4 – 6) представительные капли воды, первоначально подаваемые центробежными форсунками в проточную часть газоотводной трубы в виде конусообразного распыла, очень быстро (в непосредственной близости от места их впрыска) теряют свой начальный импульс и в дальнейшем следуют компактным «роем» вдоль линий тока газа (рис. 5), которые сильно искривлены в результате межфазного обмена импульсом.

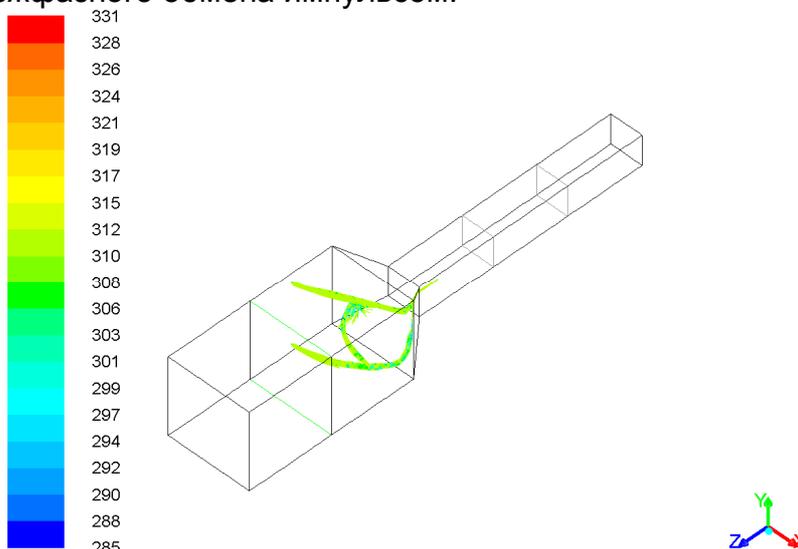


Рис. 4. Траектории капель в соответствии с их температурой, К (вариант № 1)

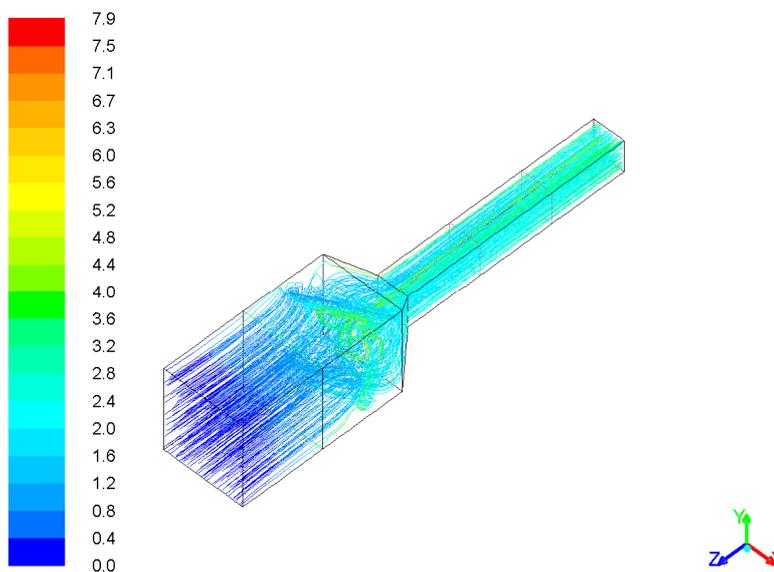


Рис. 5. Линии тока газа в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 1)

Возникающая асимметрия течения и, соответственно, асимметрия траекторий капель обусловлены высокой чувствительностью относительно малоразмерных капель ($d = 16,6$ мкм) к малым возмущениям (флуктуациям) скорости газа. Кроме того из рис. 4 видно, что капли, впрыскиваемые с начальной температурой $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в поток газа, имеющего температуру $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, в результате процессов конвективного теплообмена и испарения при движении внутри

газоотводной трубы принимают температуры от 12 до 58 °С, не достигая температуры кипения воды 100 °С.

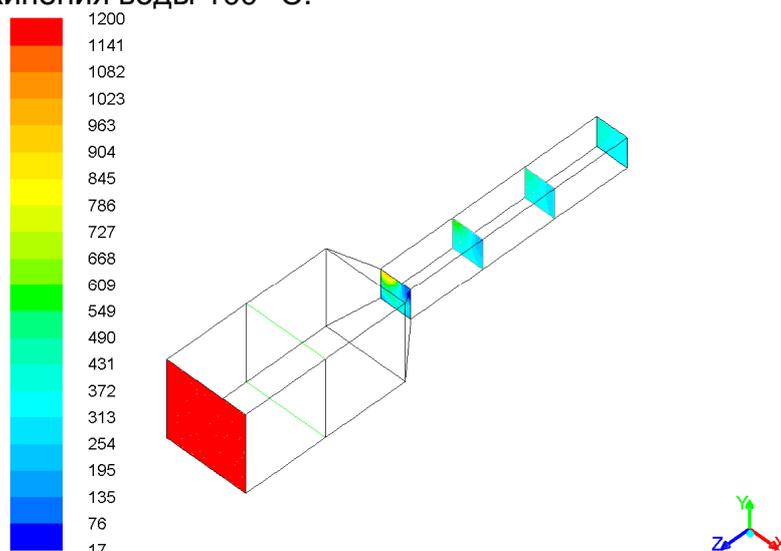


Рис. 6. Распределение температуры газа (°С) в характерных сечениях (вариант № 1)

Большая часть капель успевает испариться до входа в узкий участок газоотводной трубы, то есть до сечения № 1. Исключение составляет некоторая часть капель, порожденных форсункой № 2, которая испаряется в узком участке газоотводной трубы, а именно между сечениями № 1 и № 2. В результате численное значение средней массовой доли водяного пара $g_{H_2O\text{ср}}$ в парогазовой смеси в сечении № 1 оказывается существенно меньше равновесного, к которому данная величина стремится ниже по течению в сечениях № 2 – 4 (см. табл. 2). Соответственно численное значение средней температуры парогазовой смеси $t_{\text{ср}}$ в сечении № 1 оказывается на 55 °С больше равновесного (354 °С), к которому указанная величина стремится ниже по течению – в сечениях № 2 – 4 (см. табл. 2).

Температура парогазовой смеси и массовая доля водяного пара в ней неравномерно распределены по указанным выше сечениям, особенно в сечении № 1 (см. рис. 6), где коэффициенты равномерности составляют $\gamma_T = 0,8892$ и $\gamma_{H_2O} = 0,8804$ (см. табл. 2). При этом максимальная температура парогазовой смеси в сечении № 1, № 2, № 3 и № 4 превышает равновесную (354 °С) на 598, 239, 128 и 70 °С соответственно (см. табл. 2).

В целом можно сделать вывод, что структура и параметры газок капельного потока не соответствуют заданной схеме водяной завесы.

Учитывая вышепроведенный анализ, можно сделать вывод, что вариант № 1 подачи воды нельзя признать удовлетворительным.

В варианте № 2 (рис. 7 – 9) представительные капли воды, подаваемые центробежными форсунками в проточную часть газоотводной трубы в виде конусообразного распыла, долго сохраняют свой начальный импульс (примерно до середины ширины канала), после чего следуют по траекториям, обусловленным воздействием на капли потока газа. Эти траектории искривлены в результате межфазного обмена импульсом и рикошета от стенок газоотводной трубы. При этом в значительной степени сохраняются симметрия течения

(см. рис. 8) и, соответственно, симметрия траекторий каплей (см. рис. 7), что обусловлено слабой чувствительностью относительно крупных каплей ($d = 144$ мкм) к малым возмущениям (флуктуациям) скорости газа.

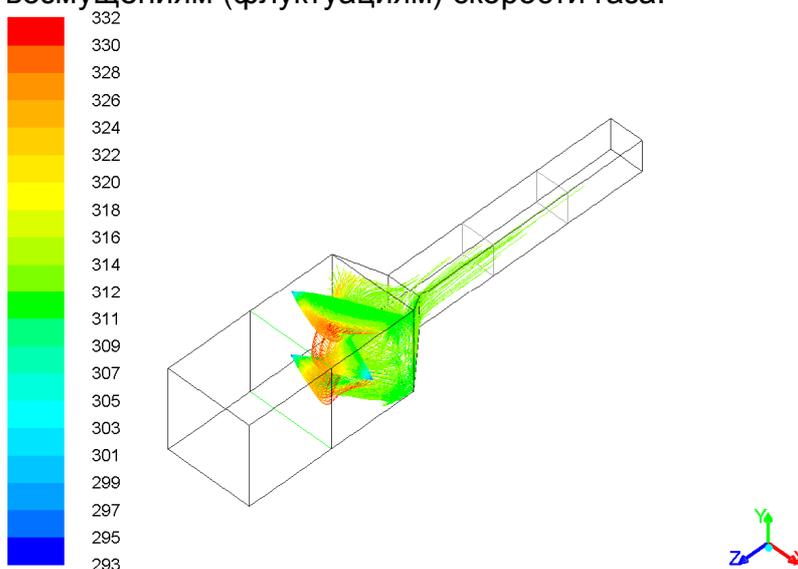


Рис. 7. Траектории каплей в соответствии с их температурой, К (вариант № 2)

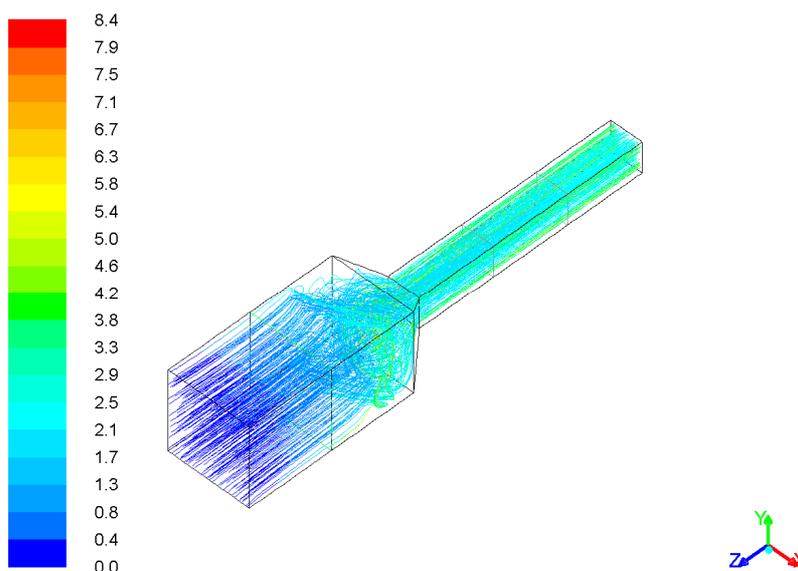


Рис. 8. Линии тока газа в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 2)

Анализ результатов численного моделирования (см. рис. 7) показывает, что капли, впрыскиваемые с начальной температурой $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в поток газа, имеющего температуру $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, в результате процессов конвективного теплообмена и испарения при движении внутри газоотводной трубы принимают температуры от 20 до $59\text{ }^{\circ}\text{C}$, не достигая температуры кипения воды $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из рис. 7 также видно, что некоторая часть каплей не успевает испариться до входа в узкий участок газоотводной трубы, то есть до сечения № 1. Их испарение продолжается в узком участке газоотводной трубы, а именно вплоть до сечения № 4. Однако количество таких каплей невелико, поскольку численное значение средней массовой доли

водяного пара $g_{H_2O_{ср}}$ в парогазовой смеси в сечении № 1 очень близко к равновесному, к которому данная величина стремится ниже по течению в сечениях № 2 – 4 (см. табл. 2).

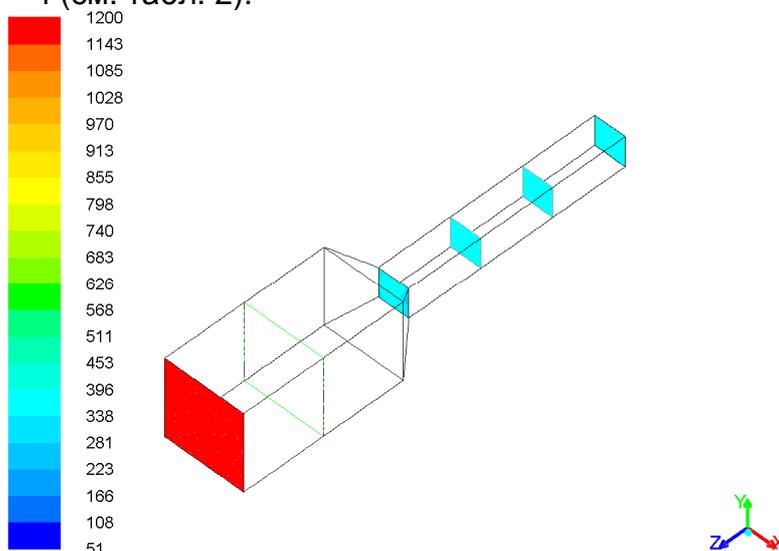


Рис. 9. Распределение температуры газа (°C) в характерных сечениях (вариант № 2)

Численное значение средней температуры парогазовой смеси $t_{ср}$ в сечении № 1 всего лишь на 3 °C превышает равновесное (354 °C), к которому указанная величина быстро стремится ниже по течению – в сечениях № 2 – 4 (см. табл. 2).

Температура парогазовой смеси и массовая доля водяного пара в ней равномерно распределены по указанным выше сечениям, в том числе в сечении № 1 (см. рис. 9), где коэффициенты равномерности составляют $\gamma_T = 0,9795$ и $\gamma_{H_2O} = 0,9799$ (см. табл. 2). При этом максимальная температура парогазовой смеси в сечениях № 1, № 2, № 3 и № 4 превышает равновесную (354 °C) всего лишь на 60, 9, 6 и 4 °C соответственно (см. табл. 2).

Таким образом, структура и параметры газок капельного потока в целом соответствуют заданной схеме водяной завесы.

На основании вышеизложенного, можно утвердительно признать удовлетворительным вариант № 2 подачи воды.

В варианте № 3 (рис. 10 – 12) представительные капли воды, подаваемые центробежными форсунками в проточную часть газоотводной трубы в виде конусообразного распыла, сохраняют свой начальный импульс практически неизменным на всей ширине канала вплоть до столкновения с его стенками, после чего следуют по траекториям, обусловленным в основном явлением рикошета и лишь в очень незначительной степени воздействием на капли потока газа. Соответственно сохраняется симметрия траекторий капель, что обусловлено крайне низкой чувствительностью очень крупных капель ($d = 514$ мкм) не только к малым возмущениям (флуктуациям), но и к осредненной скорости газа. В то же время капли оказывают сильное влияние на течение газа, которое при этом остается практически симметричным (см. рис. 11).

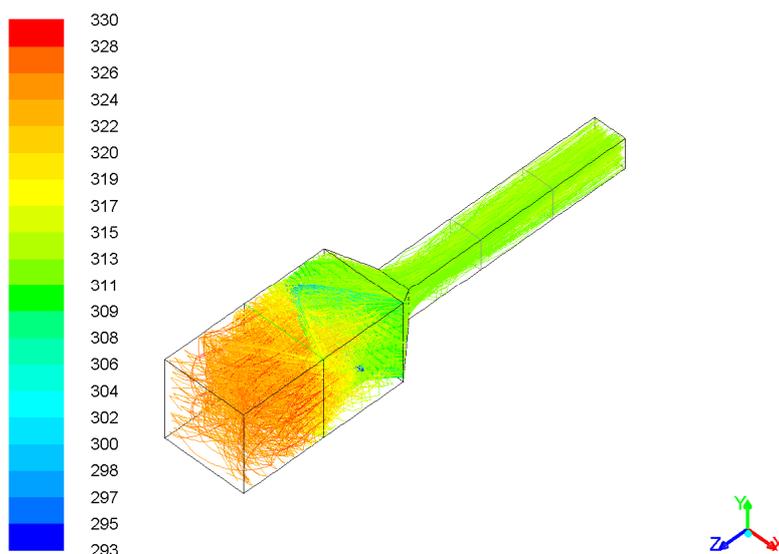


Рис. 10. Траектории капель в соответствии с их температурой, К (вариант № 3)

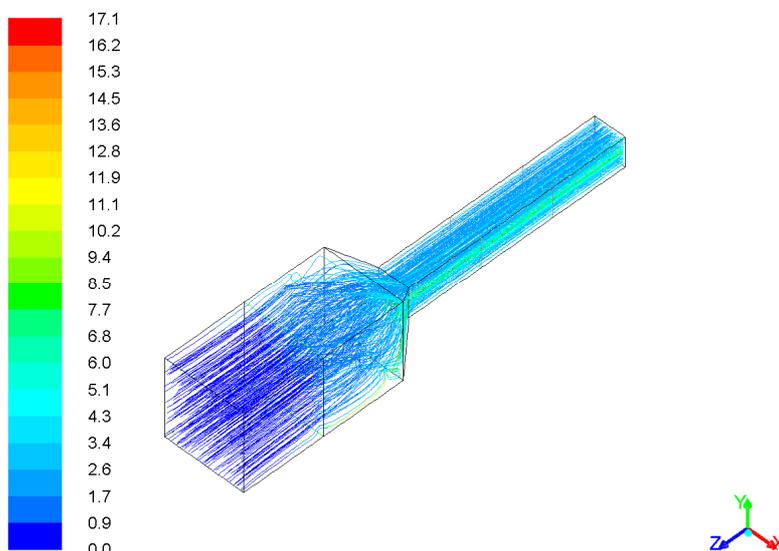


Рис. 11. Линии тока газа в соответствии с временем его пребывания, с (вариант № 3)

Далее из рис. 10 видно, что капли воды, впрыскиваемые с начальной температурой 20 °С в поток газа, имеющего температуру 1200 °С, в результате процессов конвективного теплообмена и испарения при движении внутри газоотводной трубы принимают температуры от 20 до 57 °С, не достигая температуры кипения воды 100 °С. Капли не успевают испариться не только до входа в узкий участок газоотводной трубы, то есть до сечения № 1, но и вплоть до выхода из него, то есть до сечения № 4. Хотя капли лишь частично испаряются в пределах всей газоотводной трубы, то есть между ее входным сечением и сечением № 4, рикошетируя от стенок, они весьма плотно и довольно равномерно заполняют объем проточной части. В результате численное значение средней массовой доли водяного пара $g_{H_2O_{ср}}$ в парогазовой смеси в сечении № 1 оказывается незначительно меньше равновесного, к которому данная величина медленно стремится ниже по течению в сечениях № 2 – 4 (см. табл. 2).

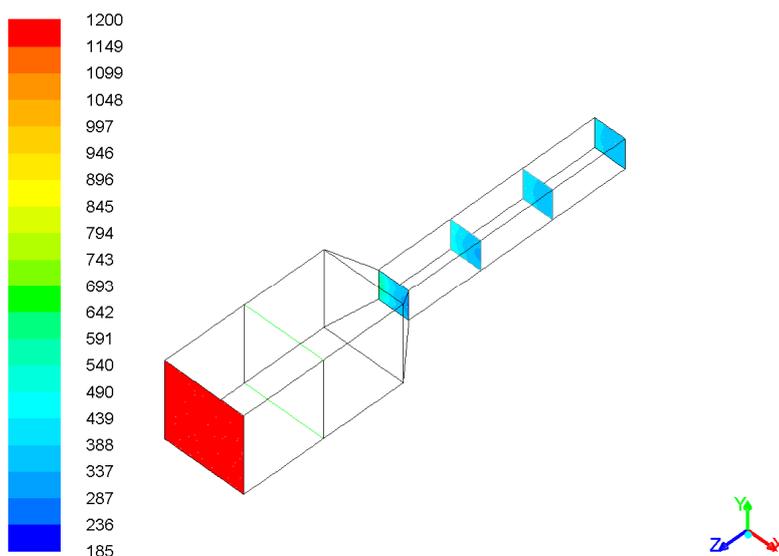


Рис. 12. Распределение температуры газа (°C) в характерных сечениях (вариант № 3)

Соответственно численное значение средней температуры парогазовой смеси t_{cp} в сечении № 1 оказывается на 64 °C больше равновесного (355 °C), к которому указанная величина стремится ниже по течению – в сечениях № 2 – 4 (см. табл. 2). Температура парогазовой смеси и массовая доля водяного пара в ней также довольно равномерно распределены по указанным выше сечениям, особенно в сечении № 1 (рис. 12), где коэффициенты равномерности составляют $\gamma_T = 0,9501$ и $\gamma_{H_2O} = 0,9443$ (см. табл. 2). При этом максимальная температура парогазовой смеси в сечениях № 1, № 2, № 3 и № 4 превышает равновесную (354 °C) на 263, 114, 68 и 43 °C соответственно (см. табл. 2).

Анализ варианта № 3 показал, что структура и параметры газокapelного потока в целом не соответствуют заданной схеме водяной завесы и вариант № 3 подачи воды нельзя признать удовлетворительным.

Очевидно, что признание удовлетворительным варианта № 2 подачи воды не исключает существования еще более совершенного варианта, для поиска которого в дальнейшем необходимо сформулировать и решить соответствующую задачу оптимизации.

Выводы

1. С помощью разработанной численной модели удалось получить расчетные оценки среднего, максимального и минимального значений температуры парогазовой смеси и содержащейся в ней массовой доли водяного пара в контрольных сечениях газоотводящей трубы, которые позволяют судить об эффективности охлаждения генераторного газа впрыском капель воды.

2. В рамках разработанной численной модели удалось выявить более эффективный способ и режим подачи воды по сравнению с существующим.

3. Для создания оптимальной конструкции форсунки в дальнейшем следует сформулировать и решить соответствующую задачу оптимизации.

Список литературы

1. Утилизация отходов методом плазменной газификации [Текст] / С. И. Планковский, Н. В. Нечипорук, В. Н. Кобрин, В. В. Вамболь // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 34. – Х., 2007. – С. 208 – 211.
2. Кобрин, В. Н. Система управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов [Текст] / В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук, В. В. Вамболь // Екологічна безпека. – Кременчук : КрНУ, 2014. – Вип. 2/2014 (18). – С. 24 – 29.
3. Вамболь, В. В. Обеспечение экологической безопасности при обращении с отходами [Электронный ресурс] / В. В. Вамболь, В. Н. Кобрин, Н. В. Нечипорук // Междунар. науч.-исслед. журнал. – 2014. – № 12(31). – С. 8 – 11. – <http://research-journal.org/issue/>.
4. Вамболь, В. В. Численное моделирование процесса охлаждения генераторного газа установки утилизации твердых бытовых и опасных отходов [Текст] / В. В. Вамболь, В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – Вып. 66. – Х., 2014. – С. 111 – 118.

Поступила в редакцию 27.02.15

Вибір структури і параметрів газокраплинного потоку в блоці охолодження газу, отриманого при термічній обробці відходів

Проведено числове моделювання фізичних процесів газокраплинного потоку в блоці охолодження генераторного газу установки утилізації відходів. Подано три варіанти способів і режимів подачі води форсунками в газовідвідну трубу. Результати параметрів газокраплинного потоку дозволяють зробити висновок про екологічну ефективності кожного досліджуваного варіанта.

Ключові слова: відходи, утилізація, блок охолодження, екологічна безпека, числове моделювання.

Choice of structure and parameters of gas-droplet stream into a gas cooling section, obtained during the thermal treatment of waste

A numerical simulation of physical processes of two-flow cooling unit generating gas installations for waste disposal. Shows three variants of the method and mode of water supply nozzles in the vent pipe. The results of two-parameter flow leads to the conclusion about the environmental effectiveness of each test option.

Keywords: waste, recycling, cooling unit, environmental safety, numerical simulation.