

аналогичных параметров для одножильного кабеля при прочих равных условиях. Полученный результат свидетельствует о необходимости учета внутренней структуры кабельного изделия при выборе режима вулканизации. Несмотря на идентичные размеры внешней оболочки кабеля целесообразно для многожильных изделий выдерживать время в специализированных нагревательных камерах существенно большее (как следствие, меньшие скорости протяжки) по сравнению с одножильными.

Разработанную модель тепломассопереноса можно использовать в качестве прогностической при выборе режимов вулканизации типичных многожильных кабелей и соответствующих параметров (температура в печи, допустимые размеры воздушных зазоров на входе и выходе камеры, время нагрева, скорость протягивания и т. д.).

Список литературы:

1. Кошелев Ф.Ф., Корнев А.Е., Климов Н.С. Общая технология резины. – М.: Химия, 1968. – 560 с.
2. Лукомская А.И., Баденков П.Ф., Кеперша Л.М. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий. – М.: Химия, 1972. – 359 с.
3. Роуч П.Дж. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
4. Джалурия Й. Естественная конвекция: тепло- и массообмен. – М.: Мир, 1983. – 399 с.
5. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 277 с.
6. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
7. Иванова Е.В., Стрижак П.А. Численное моделирование комплекса теплофизических и термохимических процессов при вулканизации кабельных изделий // Тепловые процессы в технике. – 2012. – № 4. – С. 187–192.
8. Иванова Е.В., Стрижак П.А. Численный анализ потенциала энергосбережения технологий производства кабельных изделий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2012. – № 7–8. – С. 72–79.

УДК 536.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛНОТЫ ИСПАРЕНИЯ ОДИНОЧНЫХ КАПЕЛЬ ВОДЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧЕРЕЗ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ

Волков Р.С., Стрижак П.А., д.ф.-м.н.

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: romanvolkov@tpu.ru

Результаты численных исследований [1–6] показали, что при движении через высокотемпературные ($T_f = 1100\text{--}1200\text{ K}$) газы некоторой совокупности капель воды (одной, двух, трех, четырех и пяти) с характерными размерами 0,1–5 мм испарение жидкости происходит с низкой

интенсивностью. Так, например, установлено [3–6], что при прохождении такими каплями в столбе газов высотой в несколько метров испаряется до 5–7 % от исходной массы жидкости. Водяные капли размерами более 2–3 мм могут пролетать расстояния до 6–7 м при $T_f = 1170$ К. Сделаны выводы [1–6] о том, что установленная особенность может существенно сказываться на эффективности использования воды (в том числе и тонкораспыленной) в практике тушения пожаров.

Результатов экспериментальных исследований испарения воды, движущейся через высокотемпературные продукты сгорания, не так много (особенно на уровне одиночных или малой совокупности капель). Представляется целесообразным проведение экспериментального исследования макроскопических закономерностей таких процессов в условиях, приближенных к практическим приложениям, в частности, реализующихся при формировании очагов пожаров.

Цель работы – экспериментальное исследование интегральных характеристик испарения капель воды при их движении через высокотемпературные продукты сгорания.

При выполнении экспериментов использована схема, предусматривающая сброс рабочей жидкости с определённой высоты в зону пламени (см. рис. 1). В качестве рабочей жидкости использовалась вода с незначительной примесью наночастиц диоксида титана (до 0,5 %), который был введен в рабочую жидкость для повышения контрастности видеogramм при лазерной подсветке.

На рисунке 1 приведена схема экспериментальной установки для фиксации видеogramм с изображениями капель на входе в область горения. Рабочая жидкость 8 из емкости 7 подавалась в дозатор 9, который использовался для формирования потока капель рабочей жидкости. Далее поток капель поступал в цилиндрический канал 13, заполненный высокотемпературными продуктами сгорания, где, по мере своего продвижения капли жидкости постепенно прогревались и претерпевали частичное испарение. Видеофиксация видеogramм с изображениями движущихся капель проводилась поочередно в двух рабочих областях: на входе и выходе цилиндрического канала 13 соответственно (см. рис. 1). Для регистрации видеogramм применялась измерительная PIV-система, состоящая из генератора лазерного излучения 3, двойного твердотельного импульсного лазера 4, кросскорреляционной камеры 5, синхронизатора 2 и ПК 1 со специализированным программным обеспечением, позволяющим кадрировать результаты съёмки (задержка между кадрами составляла 100 мс).

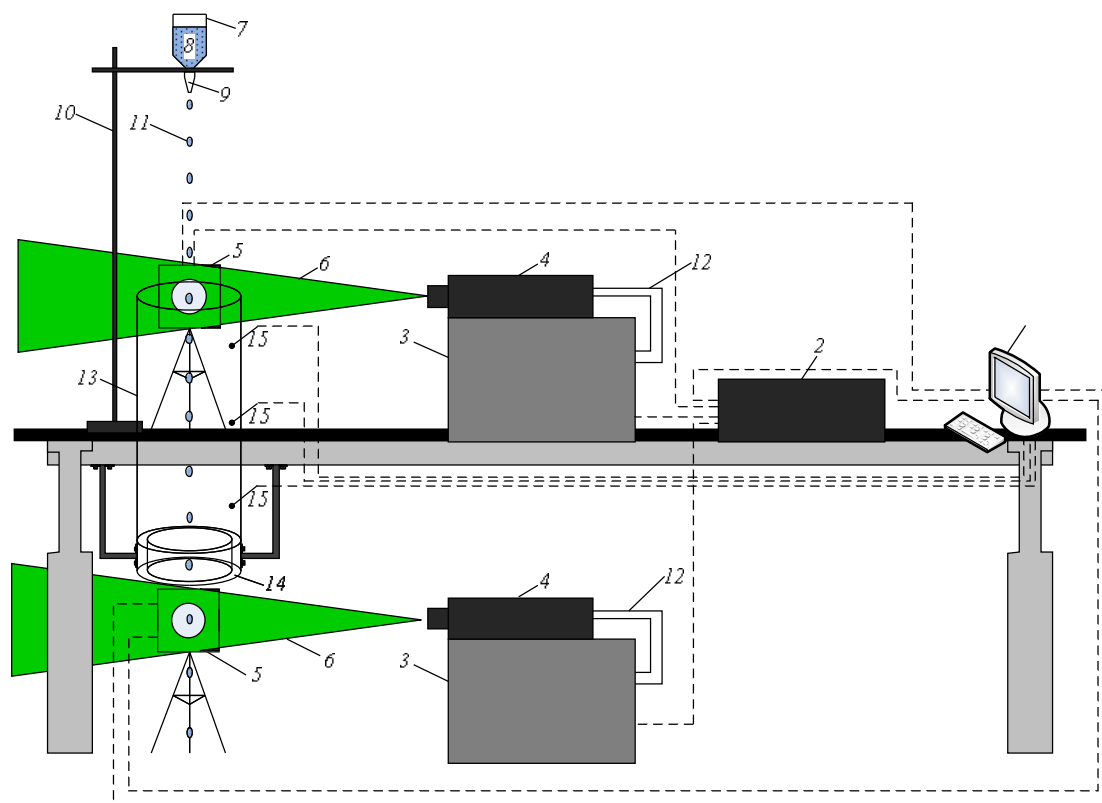


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – ПК; 2 – синхронизатор ПК, кросскорреляционной камеры и лазера;
 3 – генератор лазерного излучения; 4 – двойной твердотельный импульсный лазер;
 5 – кросскорреляционная камера; 6 – световой «нож»; 7 – ёмкость с жидкостью;
 8 – рабочая жидкость; 9 – распылитель (дозатор); 10 – штатив; 11 – капли жидкости;
 12 – канал движения вспомогательной охлаждающей жидкости;
 13 – цилиндр из жаростойкого светопрозрачного материала; 14 – полый цилиндр с горючей жидкостью; 15 – термопары

Для создания устойчивого пламени использовалось типичное жидкое топливо со стабильными характеристиками – керосин. Для регистрации температуры продуктов сгорания использовалась методика термопарных измерений. Измерения температуры выполнялись хромель-копелевыми термопарами 15 на разных отметках по высоте в зоне движения продуктов сгорания. Температура продуктов сгорания составила 1070 ± 30 К. Важно отметить, что установленные значения температуры соответствуют средней температуре пожара, т. е. наиболее типичным условиям, реализуемым на практике.

Цикл экспериментов проведен для капель с характерными размерами $R_d > 1$ мм. Так в таблице 1 представлены полученные результаты для серии экспериментов с размерами капель рабочей жидкости $R_d > 3$ мм. Установлено, что при прохождении каплями с начальными средними размерами $R_d^{cp} = 3,56$ мм расстояния в 1 м (высота канала, за-

полненного высокотемпературными продуктами сгорания, в экспериментальной установке) R_d уменьшается на 4,2 %. Этот результат хорошо согласуется с заключениями цикла численных исследований (до 5 %) [1–6].

Таблица 1. – Усредненные размеры капель рабочей жидкости до (R_d) и после (R_d^*) прохождения через высокотемпературные продукты сгорания

№ опыта	R_d , мм	R_d^* , мм	№ опыта	R_d , мм	R_d^* , мм
1	3,53	3,38	6	3,52	3,35
2	3,49	3,33	7	3,65	3,50
3	3,50	3,36	8	3,63	3,47
4	3,53	3,37	9	3,63	3,48
5	3,51	3,36	10	3,64	3,50

Выполненные серии экспериментов (см. рис. 1) показали, что даже в условиях высоких температур (1080 ± 30 К) испарение достаточно крупных капель воды ($R_d > 1$ мм) происходит очень медленно. Так, анализ полученных в ходе цикла экспериментов результатов позволил установить, что в рассматриваемых условиях доля испарившейся массы жидкости для одиночных капель воды не превышает 12 %. Очевидно, что малое значение испарившейся жидкости обусловлено главным образом большим эндотермическим эффектом парообразования ($2 \cdot 10^6$ Дж/кг).

Важно отметить, что в применяемой экспериментальной установке (см. рис. 1) дозатор при испускании рабочей жидкости придавал каплям малую начальную скорость. В реальных условиях (например, в типичных системах пожаротушения [1–5]) капли воды могут двигаться с достаточно большими (до 5 м/с) скоростями через пламена. Если к этому прибавить тот факт, что при тушении возгораний в помещениях средствами пожаротушения выбрасывается во много раз больше капель, то в результате взаимодействия их друг с другом, а также с учетом возросших скоростей, изменение характерных размеров каждой отдельной капли будет еще ниже, относительно результатов, описанных выше.

Таким образом, справедливо говорить о низкой эффективности использования крупных капель жидкости и, как следствие, о целесообразности существенного измельчения капель воды для интенсификации процессов их испарения.

Выполненные эксперименты с использованием современной измерительной PIV-системы показали, что доля испарившейся массы жидкости для одиночных капель воды, движущихся через типичные высокотемпературные ($T_f = 1080 \pm 30$ К) продукты сгорания, не превышает 12 %. Этот результат свидетельствует о целесообразности специального

распыления жидкостей и соответствующего измельчения капель для интенсификации процессов теплообмена и испарения в различных практических приложениях (в частности, при использовании распыленной воды при пожаротушении).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-620.2012.8).

Список литературы:

1. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. – № 5. – С. 74–78.
2. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование тепломассопереноса при движении «тандема» капель воды в высокотемпературной газовой среде // Тепловые процессы в технике. – 2012. – Т. 4. – № 12. – С. 531–538.
3. Стрижак П.А. Численное исследование условий испарения совокупности капель воды при движении в высокотемпературной газовой среде // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. – № 8. – С. 26–31.
4. Волков Р.С., Высокоморная О.В., Стрижак П.А. Численное исследование условий взаимодействия диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 10. – С. 74–79.
5. Андреев Г.Г., Глушков Д.О., Панин В.Ф., Стрижак П.А. Тепломассоперенос при взаимодействии диспергированного флегматизатора горения с высокотемпературными продуктами сгорания // Бутлеровские сообщения. – 2012. – Т. 31. – № 8. – С. 86–94.
6. Стрижак П.А. Численный анализ процесса испарения капли, движущейся в струе воды через высокоскоростные продукты сгорания // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21. – № 9. – С. 17–23.

УДК 620.98

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ
РАБОТЫ АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГО-
СНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ
ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ РОССИИ**

Высокоморный В.С., Высокоморная О.В., к.ф.-м.н., Стрижак П.А., д.ф.-м.н.
Томский политехнический университет, г. Томск
E-mail: VysokomornyyVS@yandex.ru

Функционирование газотранспортной системы связано со значительными затратами энергоресурсов. Как правило, на балансе газотранспортных предприятий есть удалённые от централизованной энергосистемы объекты. Как правило, единственно возможным способом подачи энергии на такие объекты является применение автономных источников энергоснабжения [1–3].