

bennosti vzbuditelei, sovershenstvovanie mer bor'by): avtoref. dis. dokt. vet. nauk. – M., 2009. – 48 s.

5. Arkhipov I.A., Arkhipova D.R. Dirofilyarioz: monografiya. – M., 2004. – 194 s.

6. Arkhipova D.R. Biologiya dirofilyarii i epizootologiya dirofilyarioza sobak v stepnoi zone yuga Rossii: avtoref. dis. kand. biol. nauk. – N. Novgorod, 2003. – 25 s.

7. Korosteleva N.I., Kondrashkova I.S., Rudishina N.M., Kamardina I.A. Biometriya v zhivotnovodstve: uchebnoe posobie. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2009. – 210 s.

8. Kotelnikov G.A. Gel'mintologicheskie issledovaniya okruzhayushchei sredy. – M.: Rossagropromizdat, 1991. – 145 s.



УДК 614.842.6

М.Г. Руденко, И.С. Щербаков  
M.G. Rudenko, I.S. Shcherbakov

## ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА С ОТКРЫТЫМ ПЛАМЕНЕМ

### FEATURES OF INTERACTION OF SUPERCOOLED WATER VAPOR WITH OPEN FLAME

**Ключевые слова:** лесной пожар, степной пожар, тушение, водяной пар, турбулентная струя, переохлажденная среда, термодинамическое равновесие.

Приведены результаты качественных экспериментов по выявлению особенностей взаимодействия переохлажденного пара с открытым пламенем, что позволяет постулировать общие описания механизмов тушения. Поток переохлажденного водяного пара может иметь различные механизмы тушения пламени: разбавление горючих продуктов пиролиза и кислорода воздуха водяным паром; изоляция пламени от кислорода окружающего воздуха; охлаждение зоны горения водяным паром. Основным механизмом тушения является охлаждение пламени.

**Keywords:** forest fire, steppe fire, water vapor, turbulent jet, supercooled environment, thermodynamic equilibrium.

The results of the experiments to reveal the interaction of supercooled water vapor with open flame are discussed; the features of that interaction enable postulating the general description of extinction mechanisms. A stream of supercooled water vapor may have different flame extinction mechanisms: diluting the combustible pyrolysis products and oxygen of air by water vapor; isolating the flame from the oxygen of the surrounding air; and cooling the combustion zone by water vapor. The main mechanism of extinction is flame cooling.

**Руденко Михаил Георгиевич**, д.т.н., доцент, проф. каф. «Энергообеспечение и теплотехника», Иркутская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: mg-rud@mail.ru.

**Щербаков Иван Сергеевич**, к.т.н., доцент, нач. научно-исследовательского и редакционного отдела, Восточно-Сибирский институт МВД России, г. Иркутск. E-mail: ivan\_7@mail.ru.

**Rudenko Mikhail Georgiyevich**, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Power and Heat Supply, Irkutsk State Agricultural Academy. E-mail: mg-rud@mail.ru.

**Shcherbakov Ivan Sergeyevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Head, Research and Publishing Division, East-Siberian Institute of RF Ministry of Internal Affairs, Irkutsk. E-mail: ivan\_7@mail.ru.

Лесные и степные пожары ежегодно наносят огромный ущерб человеку и окружающей среде. Они представляют угрозу жизни и здоровью человека выбросами в атмосферу вредных веществ, уничтожением флоры и фауны.

Основная проблема при тушении лесных пожаров заключается в несоответствии энергетических возможностей пожарных расчетов и фронта горения. Результаты исследований в области аэромеханики химически реагирующих сред показывают, что с одного погонного метра лесного пожара выделяется тепло-

вая мощность, достигающая 40 кВт и более [1]. Для успешной борьбы с огнем пожарные расчеты должны обладать аналогичной энерговооруженностью, но в условиях лесного пожара это нереально.

В последние годы под руководством профессора А.М. Гришина (Томский госуниверситет) развивается новый подход к тушению лесных пожаров, в основе которого лежит воздействие на самые уязвимые части фронта горения – зоны прогрева и пиролиза лесных горючих материалов.

Анализ существующих методов и устройств тушения низовых лесных пожаров позволил разработать новый, перспективный способ тушения – струей переохлажденного водяного пара [1-3]. Приведены результаты качественных экспериментов по выявлению особенностей взаимодействия переохлажденного пара с открытым пламенем, что позволяет постулировать общие описания механизмов тушения новым способом.

При постановке экспериментов использовали струю переохлажденного водяного пара с характеристиками, опубликованными в [4].

#### Диффузионное горение горючего газа

В качестве горючего газа использовали пропан, подаваемый через сопло газовой горелки (рис. 1 А). Динамика горения определяется интенсивностью подмешивания в струю газа кислорода воздуха [5].

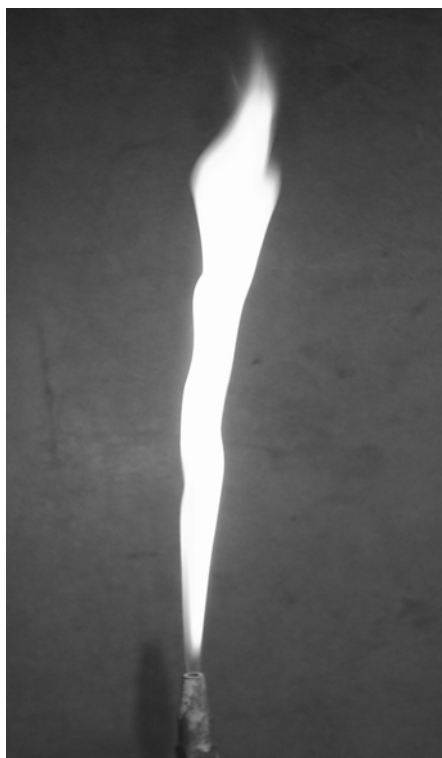
При полном введении факела пламени в струю пара горение прекращалось. При частичном введении факела пламени (примерно на 2/3 высоты) горение прекращалось по границе соприкосновения со струей (рис. 1 Б). Отметим некоторое отклонение факела в сторону движения пара, что свидетельствует и о механическом воздействии струи на пламя.

Объяснить эффект тушения только механическим воздействием струи пара на пламя

невозможно. По условию экспериментов область стехиометрических концентраций, в которой и происходит реакция окисления, должна относиться струей на расстояние, превышающее «срезанную» часть факела пламени. Это противоречит наблюдениям. Таким образом, сдвиг факела пламени может рассматриваться только как один из факторов тушения, не имеющий самостоятельного значения.

Диффузионное пламя не может существовать без подвода кислорода из окружающего воздуха. Концентрация пара в воздухе, при которой горение становится невозможным, составляет примерно 35% [6]. Концентрация пара в используемой струе зависела от удаления от сопла и изменялась от 100 до 45%, что позволяет считать изоляцию от окружающего воздуха одним из возможных механизмов тушения.

Температура струи переохлажденного водяного пара меньше, чем температура, которая сопровождает реакцию окисления продуктов пиролиза при пламенном горении. Как следствие, такая струя способна охладить факел пламени до температуры, при которой реакция окисления становится невозможной. Если принять, что происходит полное сгорание, то для этого необходимо 4,8 кг пара на 1 кг горючего газа.



А



Б

Рис. 1. Динамика горения:  
А – исходный факел пламени; Б – при введении в струю переохлажденного пара

Если горючий газ разбавлять паром, тогда, при подаче 16,6 кг пара на 1 кг газа, процесс горения становится невозможным. Отметим, что тушение (по механизму изоляции от кислорода) требует значительно меньшего количества пара. Как следствие, разбавление горючего газа следует считать вспомогательным фактором тушения, не имеющим самостоятельного значения.

Таким образом, тушение диффузионного факела пламени при воздействии на него переохлажденным водяным паром может быть достигнуто: 1) за счет изоляции горючего газа от кислорода воздуха; 2) за счет охлаждения факела пламени струей пара.

#### Кинетическое горение горючего газа

Выявленная неопределенность в оценке основного механизма тушения диффузионного факела пламени предопределила постановку экспериментов по тушению кинетического горения горючего газа (рис. 2).

При проведении экспериментов использовали смесь стехиометрической концентрации пропана с кислородом, подаваемую через сопло газовой горелки. Концентрация окисли-

теля во всех экспериментах была достаточной для полного сгорания горючего газа, без дополнительного кислорода.

При осторожном внесении кинетического факела пламени в периферийную область струи часть факела пламени «срезается» и отклоняется в сторону распространения пара (рис. 2 Б).

Срезание факела пламени не может являться следствием механического воздействия, так как факел пламени вносили на расстоянии не менее пятидесяти калибров от среза сопла парогенератора, где слой смешения сформирован. Иначе в этой зоне срезание факела пламени происходило бы у основания выходного сопла горелки.

Кинетическое горение может продолжаться без подпитки кислородом из окружающего воздуха. Тогда обрезание пламени может быть объяснено только охлаждением зоны горения. Расчетный расход пара на охлаждение факела пламени составляет 4,8 кг на 1 кг горючего газа.

Результаты расчетов, проведенных по [5-8] с учетом [9], сведены в таблицу.

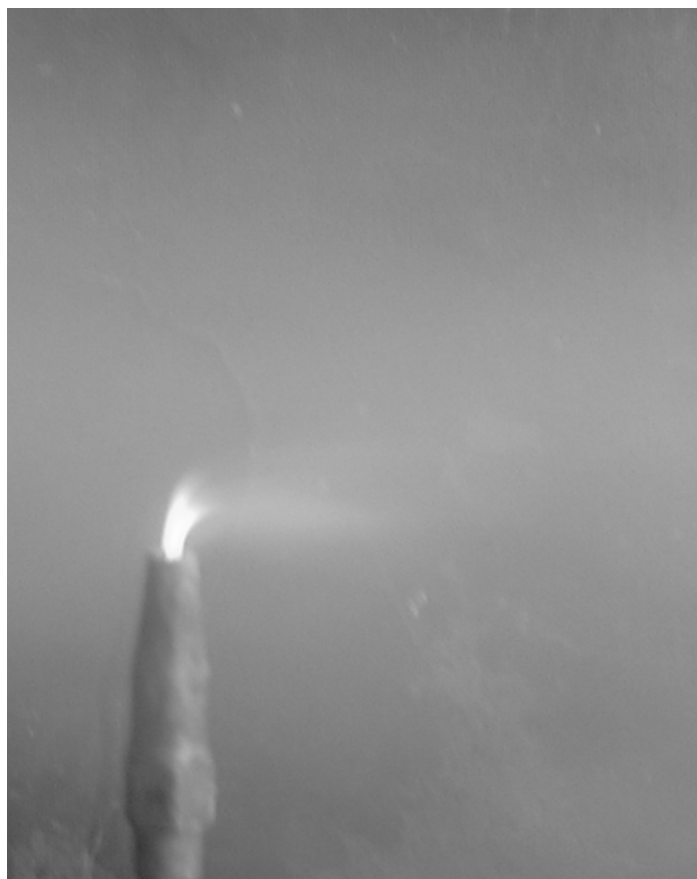
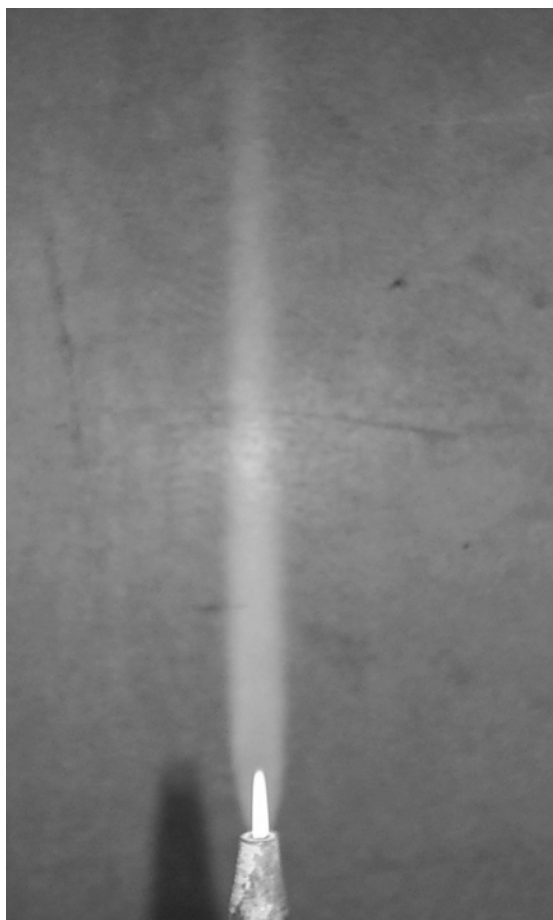


Рис. 2. Тушение кинетического горения горючего газа: А — исходный факел пламени; Б — при введении в струю переохлажденного пара

**Механизмы тушения струей переохлажденного водяного пара**

Виды очагов горения	Охлаждение факела пламени	Охлаждение горючего материала	Изоляция горючих газов (паров) от кислорода окружающего воздуха	Снижение концентрации горючих газов (паров)
Диффузионное горение горючих газов (пропан в воздухе)	4,8 кг/кг	отсутствует	возможен ( $C_{п} > C_{кр}$ )	16,6 кг/кг
Кинетическое горение горючих газов (стехиометрическая концентрация смеси пропана с кислородом)	4,8 кг/кг	отсутствует	невозможен	невозможен

Примечание. \*Сдвиг факела пламени во всех случаях невозможен.

**Выводы**

1. Поток переохлажденного водяного пара может иметь различные механизмы тушения пламени:

- разбавление горючих продуктов пиролиза и кислорода воздуха водяным паром
- изоляция пламени от кислорода окружающего воздуха;
- охлаждение зоны горения водяным паром.

2. Основным механизмом тушения является охлаждение пламени.

**Библиографический список**

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981. – 277 с.

2. Руденко М.Г., Щербаков И.С. Методы тушения лесных пожаров // Вестник ВСИ МВД России. – 2001. – № 4. – С. 47-64.

3. Руденко М.Г., Щербаков И.С., Гришин А.М. Способ тушения пожара: пат. 2216367 Россия / Восточно-Сибирский институт МВД России. – № 2002102296/12; заявл. 25.01.02; опубл. 27.06.03.

4. Руденко М.Г., Щербаков И.С. Некоторые характеристики струи переохлажденного водяного пара. Сопряженные задачи механики, информатики и экологии: матер. 5-й Междунар. конф. (г. Томск, 15-20 сентября 2002 г.). – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. – 262 с.

5. Абдурагимов И.М., Андросов А.С., Исаева Л.К., Крылов Е.В. Процессы горения. – М., 1984. – 268 с.

6. Баратов А.Н. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. – М.: Химия, 1987. – С. 129.

7. Башкирцев М.П., Бубыр Н.Ф., Минаев Н.А., Ончуков Д.Н. Основы пожарной теплофизики. – М., 1984. – 194 с.

8. Абдурагимов И.М., Говоров В.Ю., Макаров В.Е. Физико-химические основы развития и тушения пожаров. – М., 1980. – 255 с.

9. Алтухов И.В., Очиров В.Д. Оптические свойства сельскохозяйственных продуктов растительного и животного происхождения // Вестник Иркутской сельскохозяйственной академии. – 2009. – № 37. – С. 43-49.

**References**

1. Grishin A.M. Matematicheskie modeli lesnykh pozharov. – Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 1981. – 277 s.

2. Rudenko M.G., Shcherbakov I.S. Metody tusheniya lesnykh pozharov // Vestnik VSI MVD Rossii. – 2001. – № 4. – S. 47-64.

3. Sposob tusheniya pozhara: Pat. 2216367 Rossiya / Rudenko M.G., Shcherbakov I.S., Grishin A.M.; Vostochno-Sibirskii institut MVD Rossii. – № 2002102296/12; zayavl. 25.01.02; opubl. 27.06.03.

4. Rudenko M.G., Shcherbakov I.S. Nekotorye kharakteristiki strui pereokhlazhdenogo vodyanogo para. Sopryazhennyye zadachi mekhaniki, informatiki i ekologii: Materialy 5-i mezhdunarodnoi konferentsii, Tomsk, 15-20 sentyabrya 2002 goda. – Tomsk: Izd-vo Tom. un-ta, 2002. – 262 s.

5. Abduragimov I.M., Androsov A.S., Isaeva L.K., Krylov E.V. Protsessy goreniya. – M., 1984. – 268 s.

6. Baratov A.N. Pozharnaya bezopasnost'. Vzryvobezopasnost'. – M.: Khimiya, 1987. – S. 129

7. Bashkirtsev M.P., Bubyr' N.F., Minaev N.A., Onchukov D.N. Osnovy pozharnoi teplofiziki. – M., 1984. – 194 s.

8. Abduragimov I.M., Govorov V.Yu., Makarov V.E. Fiziko-khimicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov. – M., 1980. – 255 s.

9. Altukhov I.V., Ochirov V.D. Opticheskie svoystva sel'skokhozyaystvennykh produktov rastitel'nogo i zhivotnogo proiskhozhdeniya // Vestnik Irkutskoi sel'skokhozyaystvennoi akademii. – 2009. – № 37. – S. 43-49.

