

УДК 544.454; 536.46; 614.841.1

А.А. Лоцилов, М.Н. Ильичева, В.В. Иконников,
Д.А. Шаулов, Ю.Ф. Орлов, А.В. Зенькович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУШЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА ПРИ ПОМОЩИ НАПРАВЛЕННОГО ВЗРЫВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Работа посвящена численному моделированию тушения лесного пожара при помощи взрыва. Использование направленного взрыва в заданном диапазоне углов позволяет усилить в нем ударную волну, повышая эффективность тушения пожара. Практическое применение данного подхода требует изучения закономерностей протекающих процессов. Используется новая упрощенная модель взрыва, основанная на мгновенном сдвиге среды вокруг точки детонации, а также срыве элементов растительности ударной волной. Доля срываемых элементов определяется на основе экспериментальных данных. На основе численного моделирования исследуется динамика лесного пожара после воздействия взрывной волны. В результате серии расчетов выявлено, что масса взрывчатки, требуемая для эффективного тушения волны горения, незначительно меняется при расстоянии от 1 до 4 м между зарядом и зоной прогрева пожара.

Ключевые слова: численное моделирование, лесной пожар, направленный взрыв, тушение пожара при помощи взрыва.

Введение

Тушение пожаров при помощи взрывов – одно из актуальных направлений научных исследований. Прекращение горения происходит за счет отбрасывания пламени от горючих материалов взрывной волной. Это разрушает структуру пламени и предотвращает его поддержку за счёт окисления горючего, после чего горение прекращается. Дополнительно к этому взрыв может переносить тушащее вещество, например, воду, которая измельчается ударной волной и быстро доставляется в область пламени.

Воздействию взрыва на лесной пожар посвящено большое количество работ. Среди них следует выделить работы [1, 2]. В работе [1] выполнено моделирование динамики ударной волны при постоянном коэффициенте аэродинамического сопротивления леса и детерминированном критерии отрыва растительности, основанном на пороговом значении избытка давления. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что полного отрыва элементов растительности не происходит и существует тенденция к убыванию доли сорванных элементов растительности [2].

Цель исследования

Использование направленного взрыва в заданном диапазоне углов позволяет усилить в нем ударную волну, повышая эффективность тушения пожара. В данной работе выполняется анализ эффективности тушения лесного пожара при помощи направленного взрыва на основе численного моделирования. Выполнена серия расчётов, в которых варьировались масса взрывного заряда и расстояние от него до активатора, который инициировал взрыв при нагреве до 500 К. На рис. 1 показано взаимное расположение взрывного заряда, его активатора и направление взрыва. Диапазон углов от -60° до $+60^\circ$ относительно горизонта.

Для определения доли отбрасываемых элементов растительности было учтено, что доля сорванных элементов растительности имеет тенденцию к убыванию с ростом расстояния без жестко определенного перепада давления или расстояния [2]. В связи с этим, для определения закономерностей срыва растительности решается обратная задача.

В данной работе предполагается, что доля сорванных элементов определяется формулой

$$D_{break}(x, z) = \left[1 - \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{x_f(x, z)(2\pi\varphi^{-1}W)^{-0.5} - \mu}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right] \right] \Psi(x, z) \quad (1)$$

где $x_f(x, z)$ – расстояние от эпицентра до точки, м; W – масса шнурового заряда, отнесенная к его длине, кг/м; μ и σ – параметры нормального распределения, $m^{3/2}$ и $kg^{-1/2}$ соответственно; $\Psi(x, z)$ – функция, принимающее значение 1 в направлении взрыва и 0 за его пределами; φ – угол, в котором направлен взрыв; $\Phi(x)$ – функция ошибок (Лапласа), имеющая следующий вид

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

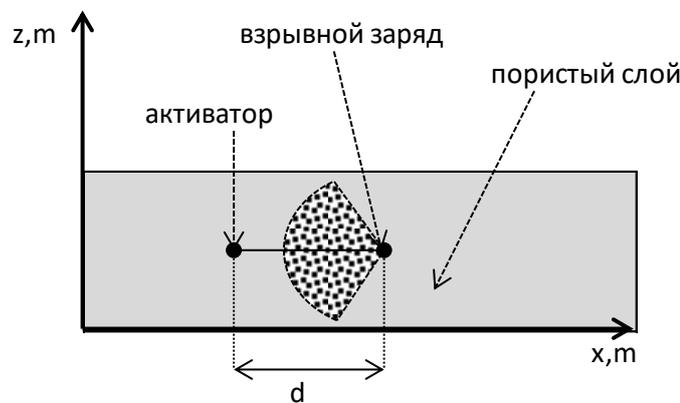


Рис. 1. Схема тушения пожара направленным взрывом

Значения параметров нормального распределения μ , σ определялись на основе согласования экспериментальных данных работы [2] с формулой (1).

В основе работы использовалась математическая модель, описанная в [3, 10]. В процессе моделирования среда предполагалась однотемпературной, а протекающие газодинамические процессы независимыми от координаты y [4-5]. При моделировании лучистого теплопереноса пожара использовано диффузионное приближение с учетом серости среды [6-8]. При расчетах пожара использовались параметры, приведенные в работах [9-10]. Считается, что взрыв происходит мгновенно, высвобождая тепловую энергию и продукты реакции вокруг точки расположения заряда, занимая объем, требуемый для их размещения при температуре взрыва и постоянном давлении. Это, в свою очередь, приводит к мгновенному сдвигу среды в диапазоне углов, соответствующем направленному взрыву, перенося массу, импульс и энергию газовой фазы. После взрыва учитывается перераспределение энергии между газовой и конденсированной фазой и далее с учетом этих изменений возобновляется моделирование лесного пожара.

Результаты

Динамика лесного пожара, сформировавшаяся к моменту взрыва, была одинаковой во всех случаях. Она показана на рис. 2. Взрыв происходил в момент достижения температуры 500 К в точке расположения активатора с координатами $x=27$ м, $z=1.5$ м. Сдвиг заряда в положительном направлении оси x был варьируемым параметром, а его значения указаны ниже. Стрелки показывают направление течения газовой фазы, заливка области цветом – температура, согласно шкале, зеленая линия – контур доли непрореагировавшего сухого органического вещества 50% от исходного значения, крестик – положение заряда.

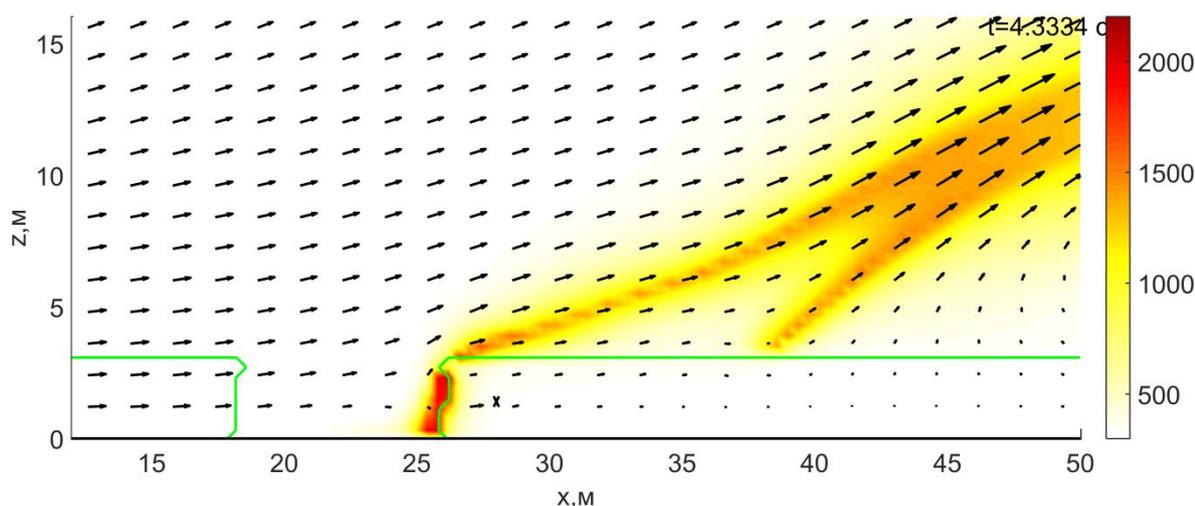


Рис. 2. Динамика лесного пожара до взрыва

На рис. 3 показана динамика распространения лесного пожара после направленного взрыва массой 0,5 кг/м на расстоянии 1 м от активатора. На первом этапе происходит отрыв части пламени от лесной растительности. Данный эффект связан с тем, что взрывная волна переносит только газовую фазу вместе с её энергией, тогда как конденсированная фаза вновь нагревает вокруг себя среду, как показано на момент времени 4,4 с. На момент 5 с видно, что верхняя часть нагретой области унесена с конвективной колонкой, тогда как нижняя входит в область невыгоревшей растительности. На момент 5,2 с процесс горения вновь начинает развиваться в нижней части слоя лесной растительности, что, в конечном счете, приводит к возобновлению пожара.

В случае увеличения массы заряда до 0,6 кг/м динамика в целом аналогична, однако мощности очага горения в приземной области недостаточно для возобновления устойчивого горения, что в итоге приводит к затуханию.

При увеличении расстояния заряда от волны горения до 2 м имеет место отражение ударной волны от поверхности земли и её частичное рассеяние над пористым органическим слоем. Динамика пожара после взрыва, при массе заряда 0,7 кг/м, в этом случае показана на рис. 4. Так же, как и в случае меньшего расстояния от заряда до волны горения, нагретая среда остается в приземной области. Массы заряда 0,7 кг/м достаточно, чтобы пожар не возобновился, а при 0,6 кг/м происходит повторное возгорание.

Динамика при расстоянии от заряда до волны горения до 4 м показана на рис. 5. После взрыва его энергия поглощается конденсированной фазой, что приводит к охлаждению среды и формированию вихря вокруг него на момент $t=4.35$ с. В результате имеет место ускоренное втягивание остатков нагретой газовой фазы в область горючего пористого слоя и возобновление горения в момент $t=4,7$ с. Начало процесса возобновления пожара показано на момент 5,1 с.

Как видно из результатов расчёта, во всех случаях имеет место отбрасывание волны горения назад, после чего происходит частичное рассеяние её энергии и возвращение вместе с внешним полем скоростей в область с запасом горючих материалов. В зависимости от массы заряда оставшейся его части определяется, достаточно ли энергии волны горения для возобновления пожара.

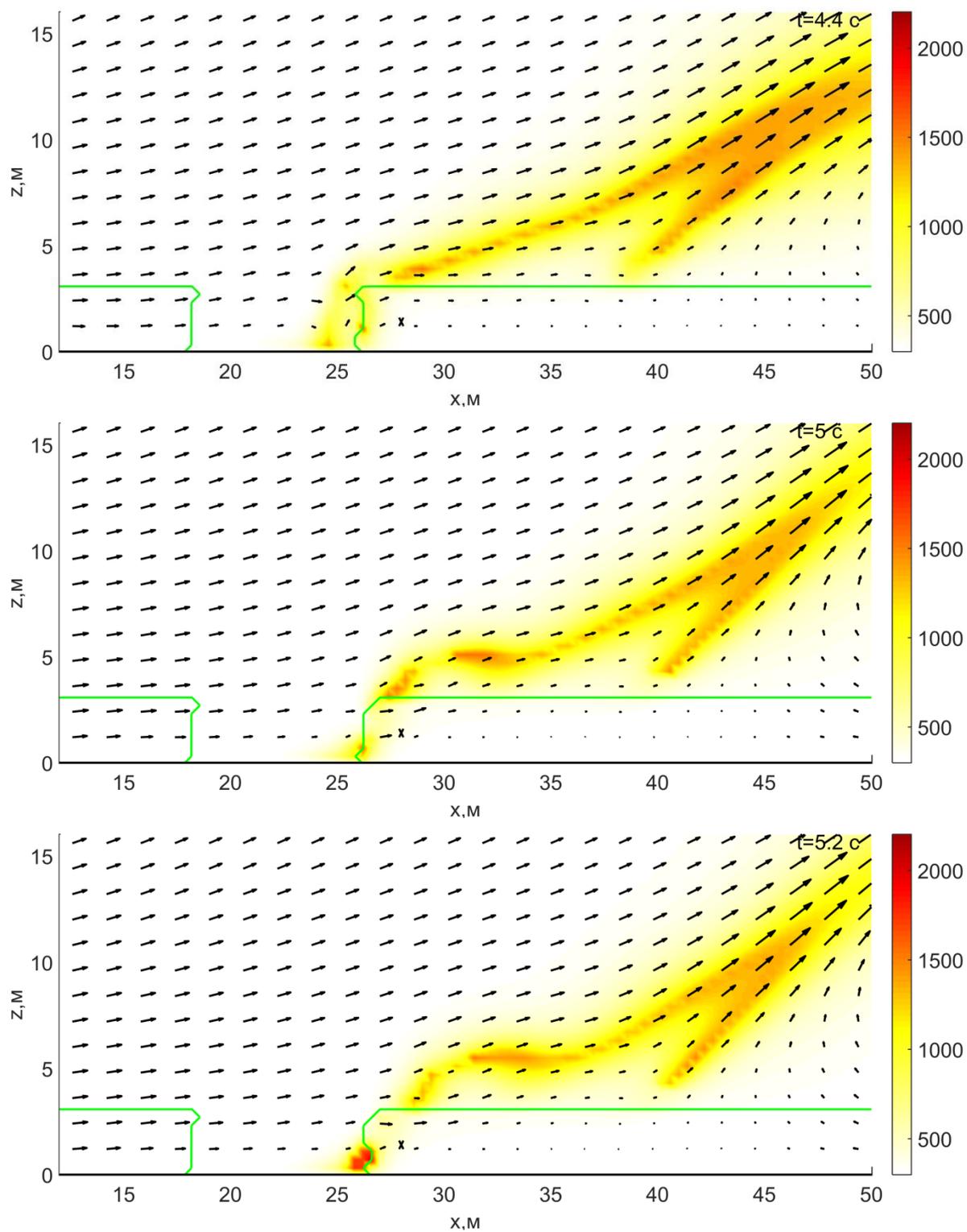


Рис. 3. Динамика лесного пожара после взрыва заряда массой 0,5 кг/м на расстоянии 1 м от волны горения

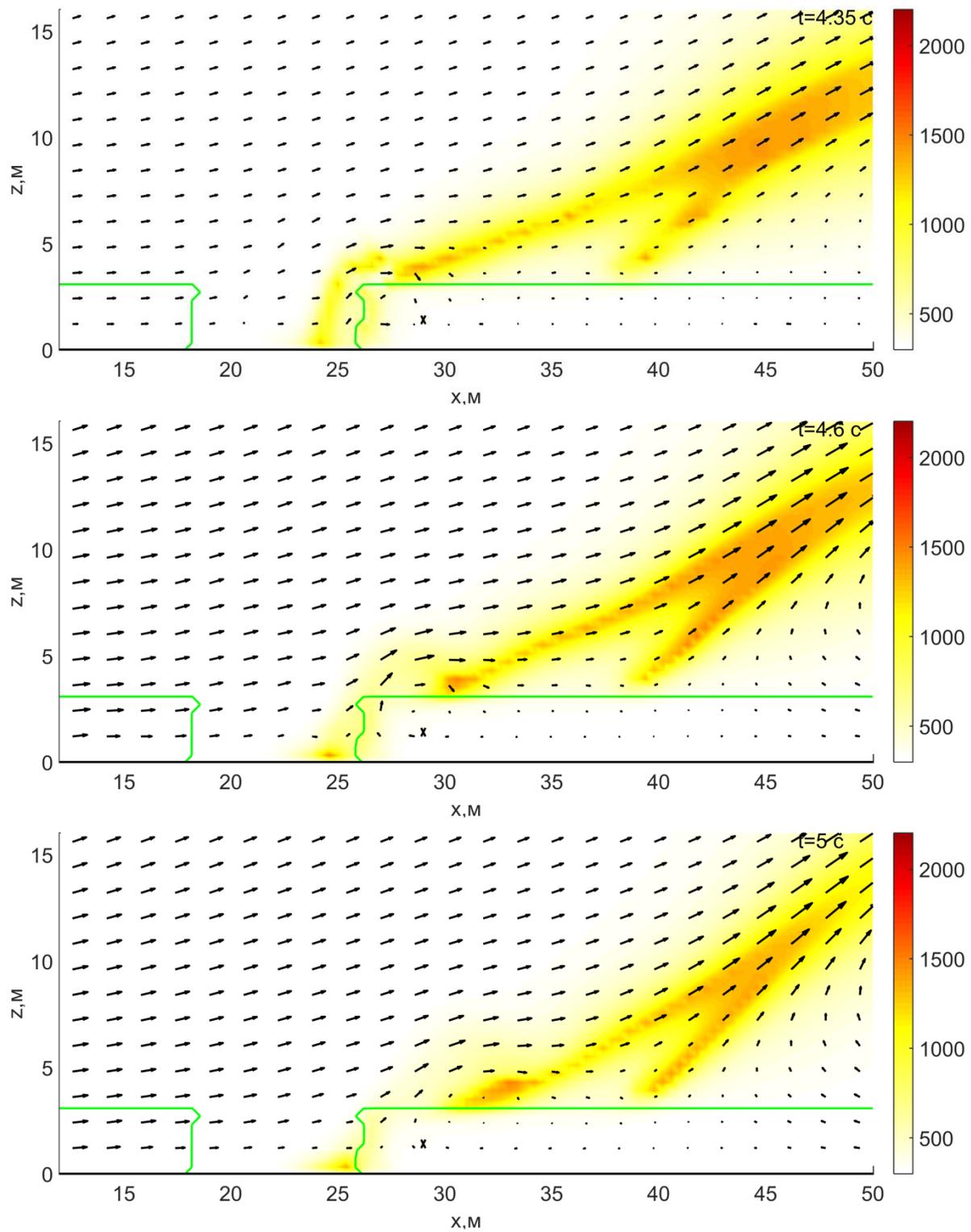


Рис. 4. Динамика лесного пожара после взрыва заряда массой 0,7 кг/м на расстоянии 2 м от волны горения

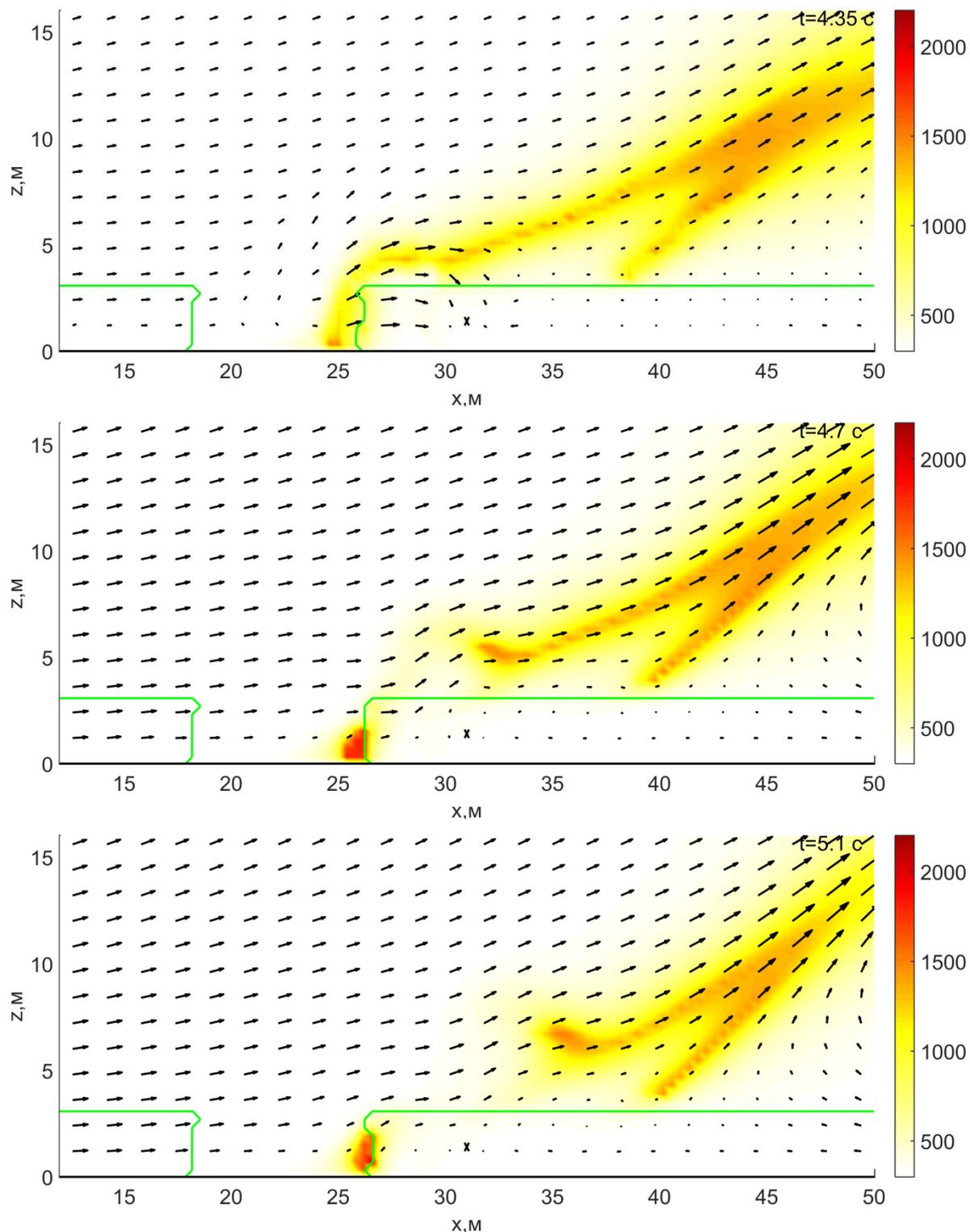


Рис. 5. Динамика лесного пожара после взрыва заряда массой 0,6 кг/м на расстоянии 4 м от волны горения

Обсуждение

В случае направленного взрыва расстояние до волны горения оказывает незначительное влияние на эффективность тушения пожара в достаточно широких пределах. Это весьма полезно, так как в реальных условиях пожар может находиться на разном расстоянии от частей шнурового заряда.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования направленных взрывов при тушении лесных пожаров. В то время как в случае тушения водой имеют место потери ее за счет стекания на землю, испарения до достижения зоны горения, прилипания к элементам растительности. Техника тушения пожаров взрывами свободна от этого недостатка. Потери механической энергии и импульса ударной волны за счёт аэродинамического сопротивления растительности не оказывают влияния на массу газа, вытесняющего волну горения.

К недостаткам использования взрывов при тушении лесных пожаров следует отнести невозможность скорректировать действия в процессе тушения пожара с учетом его динамики, что накладывает более высокие требования на предварительное изучение сопутствующих процессов.

Библиографический список

1. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование срыва лесных горючих материалов в результате взрыва шнурового заряда взрывчатого вещества / А.М. Гришин, А.Ф. Цимбалюк // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т. 42, № 3. – С. 92-99.
2. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. - Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1992. – 405 с.
3. **Катаева, Л.Ю.** О методе Гира численного моделирования динамических систем, описываемых жесткими обыкновенными дифференциальными уравнениями / Л.Ю. Катаева, В. Б. Карпухин // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 1. – С. 57-66.
4. **Катаева, Л.Ю.** Анализ динамических процессов аварийных ситуаций природного и техногенного характера: дис. ... докт. физ.-мат. наук / Л.Ю. Катаева. – Нижний Новгород, 2009.
5. **Катаева, Л.Ю.** Численное моделирование динамики пожара с учетом рельефа местности и внешнего поля скоростей / Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников, И.Е. Белоцерковская // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 12. – С. 49-58.
6. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование сушки слоя лесных горючих материалов / Гришин А.М., Катаева Л.Ю., Лобода Е.Л. // Вычислительные технологии. – 2001. – Т. 6. – С. 140.
7. **Масленников, Д.А.** Об особенностях моделирования излучения при пожарах / Д.А. Масленников, Л.Ю. Катаева, И.Е. Белоцерковская // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2012. – № 2 (95). – С. 66-75.
8. **Масленников, Д.А.** Особенности численного моделирования распространения суммарного теплового потока при лесных пожарах / Д.А. Масленников, И.Е. Белоцерковская, С.А. Лощилов, Л.Ю. Катаева. – Нижний Новгород, 2013.
9. **Kataeva, L.Y.** On the laws of combustion wave suppression by free water in a homogeneous porous layer of organic combustible materials / L.Y. Kataeva, D.A. Maslennikov, N.A. Loshchilova // Fluid Dynamics. – Vol. 51, No 3. – P. 389-399, 2016.
10. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование некоторых экологических последствий природных и техногенных катастроф: отчет о НИР / А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.П. Зима, Л.Ю. Катаева, А.Н. Субботин, Р.Ш. Цвык, А.Ф. Цимбалюк. № 96-01-00011 (Российский фонд фундаментальных исследований).

*Дата поступления
в редакцию: 25.09.2018*

**A.A. Loschilov, M.N. Ilcheva, V.I. Ikonnikov, D.A. Shaulov,
Yu.F. Orlov, Zen'kovich A.V.**

**MATHEMATICAL MODELING OF FOREST FIRE EXTINGUISHING
WITH DIRECTIONAL EXPLOSION**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

Purpose: Numerical modeling of forest fire extinguishing with the explosion.

Methodology: We use simplified explosion model based on an instantaneous medium shift around the detonation point and vegetable elements breaking by explosion wave. The fraction of broken elements is determined on the basis of experimental data. On the basis of numerical modeling; the dynamics of forest fire after explosive wave is investigated.

Value: The result a series of calculations revealed that the mass of explosive required to effectively extinguish a combustion wave varies slightly at a distance of from 1 to 4 meters between the explosion and warm-up area of fire.

Research implications: The practical application of this approach requires studying the regularities of the processes that are taking place. The use of directional explosion in a given range of angles allows strengthening the shock wave in it, increasing the efficiency of fire extinguishing.

Keywords: numerical modeling, forest fire, directional explosion, fire extinguishing with explosion.