

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СВС ЭНТРОПИЙНЫМИ МЕТОДАМИ

М.В.Полторыхин

1. Введение

Развитие промышленных технологий получения изделий и покрытий из композиционных материалов, основанных на самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС), напрямую связано с развитием и совершенствованием методов исследования СВС.

Процессам СВ-синтеза характерны высокие температуры, быстротечность и дисперсность. Поэтому, для их исследования требуется создание измерительной аппаратуры и методик, учитывающих эти свойства. Важно отметить, что в теоретических моделях этих процессов, в большинстве случаев, не учитывается дисперсность среды, описание ведется в непрерывных переменных, волна горения обычно считается однородной, распространяющейся в гомогенной среде, хотя из экспериментов известно, что зона реакции состоит из дискретных очагов, которые находятся на разных стадиях реагирования и имеют различную температуру.

В многочисленных публикациях по СВС (работы Мержанова А.Г., Итина В.И., Найбороденко Ю.С., Евстигнеева В.В., Зенина А.А., Александрова В.В. и др.) указывается на необходимость развития методов их изучения, в частности, методов, позволяющих исследовать кинетику и структуру горения. Применение телевизионных измерительных систем (ТИС) на базе ФДМ или ПЗС-матриц для исследования пространственных параметров зоны СВ-синтеза является перспективным направлением развития таких методов. Использование ТИС в сочетании с ЭВМ позволяет быстро накапливать измерительные данные (цифровые изображения). Анализ моделей изображений и способов их обработки с целью выделения объектов показал, что существующие алгоритмы линейной и ранговой фильтрации требуют принятия определенных моделей зашумленных изображений и фильтров, соответственно. С другой стороны, выделение объекта на изображении является, по существу, получением и выявлением информации, что обуславливает применение выводов теории информации и так называемого «теоретико-информа-

ционного» подхода [1], использующего энтропийный критерий анализа. Так как информационная энтропия зависит только от вероятности отдельных значений сигнала, применение энтропийного критерия анализа не требует разработки специальных моделей изображений [2].

2. Обоснование энтропийного подхода к анализу СВС-изображений

Результатом телевизионной регистрации СВС с использованием ТИС являются двумерные изображения, яркость точек (пикселей) которых является монотонной функцией от температуры. Наличие зон с различной температурой в процессе СВС определяет наличие в телевизионном изображении пикселей различной яркости и, соответственно, отражает изменение энтропии, обусловленное гетерогенной структурой области фронта горения. Таким образом, энтропия может использоваться как критерий выделения различных зон теплового изображения, соответствующих различным этапам СВС в режиме фронтального горения. Расчет энтропии изображения по определению К.Шеннона [3,4] производится с помощью его гистограммы распределения яркостей:

$$H = -\sum_{i=1} p_i \cdot \log_2 p_i, \quad (1)$$

где p_i – вероятность присутствия в изображении точек с яркостью I_i .

Каждый пиксел плоского полутонового изображения характеризуется целочисленным значением яркости и целочисленными координатами.

Энтропийным аналогом случайной погрешности является энтропийное значение случайной погрешности:

$$\Delta_s = \pm(\exp(H(x)))/2, \quad (2)$$

которая связана со среднеквадратической погрешностью σ в виде $\Delta_s = k \cdot \sigma$, где энтропийный коэффициент k является энтропийным аналогом коэффициента Стьюдента [5], а величина $2\Delta_s$ определяет интервал

значений случайной величины по аналогии с доверительным интервалом. Пользуются также понятием относительной избыточности [4]:

$$D = \frac{H_{\max} - H}{H_{\max}} = 1 - \frac{H}{H_{\max}}. \quad (3)$$

Максимально возможное количество информации получается тогда, когда полностью снимается неопределенность, причем для наибольшей неопределенности вероятности всех событий должны быть одинаковыми [4].

Анализируя график функции $p_i \cdot \text{Log}_2 p_i$, из рис. 1 видно, что наибольший вклад вносят события [4], вероятности которых наиболее приближены к максимуму функции $f_3(p)$. Упорядочив события по возрастанию или убыванию вклада в значение энтропии, можно отсеивать события, по правилу сохранения наибольшей или наименьшей энтропии.

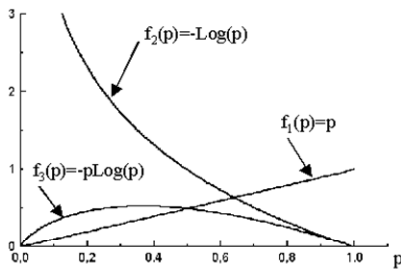
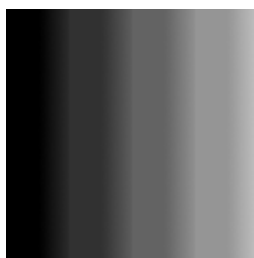
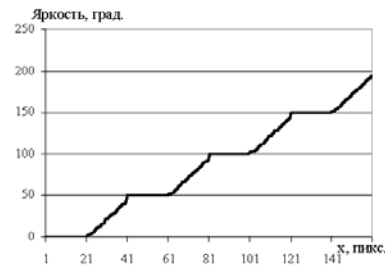


Рис.1.График функции $f(p) = -p \cdot \text{Log}(p)$

Рассмотрим применение этого правила. На рис. 2 (а), (б) представлено тестовое изображение с полосками равной ширины (20 пикселей) и его профиль. Четыре полоски имеют фиксированные яркости (0, 50, 100, 150), а яркости других четырех равномерно изменяются между яркостями соседних полосок. Отсеивая градации яркостей, вносящих наибольший вклад в энтропию, выделяются зоны с переходом яркости (рис. 2(в)).



(а)



(б)



(в)

Рис. 2. Тестовое изображение (а), профиль изображения (б), результат отсеивания яркостей, вносящих наибольший вклад в энтропию (в)

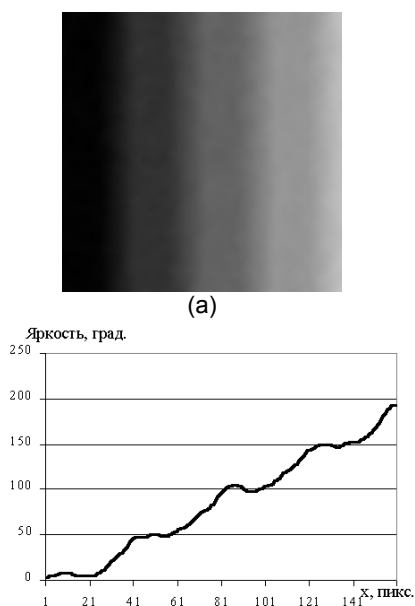
Алгоритм работает эффективно и с зашумленными изображениями. Для этого в тестовое изображение (рис. 2(а)) добавим гауссовский шум с мощностью 10 градаций яркости с последующим сглаживанием. Новое изображение, его профиль и результаты отсеивания градаций с максимальным вкладом в энтропию показаны на рис. 3 (а), (б), (в).

3. Исследование энтропийными методами волны горения в процессе СВС

Температурный профиль волны горения в плоском канале. На рис. 4 приведена упрощенная схема эксперимента. После тщательного смешивания порошков никеля Ni и алюминия Al смесь засыпалась ровным слоем в керамическую ванночку. Телевизионная камера крепилась на штативе так, чтобы оптическая ось объектива камеры была перпендикулярна горизонтальной плоскости стола. Телевизионный сигнал с камеры поступал на адаптер ввода изображения, оцифровывался и записывался на жесткий диск ЭВМ в цифровом видеоформате [2]. Для обработки, видеофайл конвертировался в набор двумерных цифровых изображений с 256-ю градациями яркости. Перед проведением эксперимента проводилась коррекция камеры на геометрические и мультипликативные иска-

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СВЧ ЭНТРОПИЙНЫМИ МЕТОДАМИ

жения с использованием темновых и серых кадров.



(б)

(в)

Рис. 3. Тестовое изображение (а), профиль изображения (б), результат отсеивания яркостей, вносящих наибольший вклад в энтропию (в)

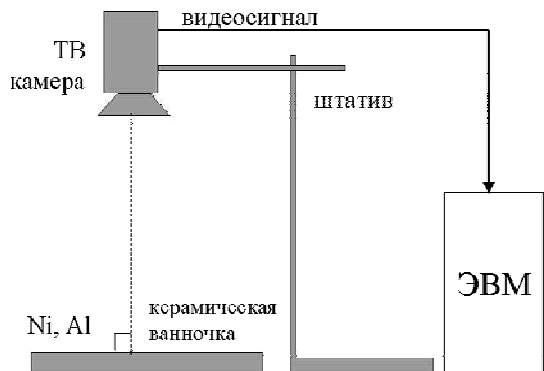


Рис. 4. Схема эксперимента по съемке СВС

Методика такой калибровки позволяет учесть средний темновой ток фотоприемника, скорректировать линейные искажения и неодинаковость коэффициентов усиления фотоячеек [2]. По результатам калибровки можно сделать вывод о том, что аддитивный шум имеет нормальное распределение со среднеквадратическим отклонением порядка 1,2–1,4 градации яркости, а максимальные отклонения сигнала, вызванные аддитивным шумом, с надежностью 98%, не превышают пяти градаций яркости, и они отражают реально возможное дезинформационное действие шума. Мультипликативные искажения незначительны и после калибровки ими можно пренебречь. Критерий χ^2 (хи-квадрат) подтвердил проверку на нормальность [2].

На рис. 5 представлены поверхности, построенные по яркостям цифрового изображения с его последующим сглаживанием, и, соответственно, отражающие температурный профиль волны горения.

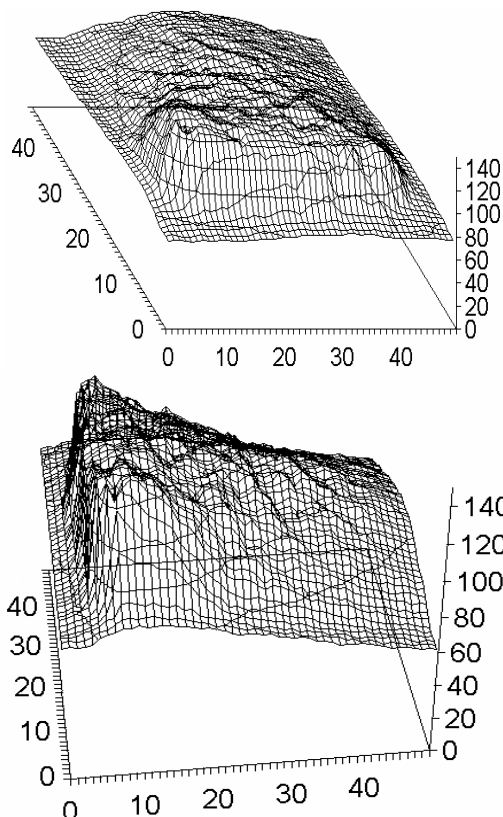


Рис. 5. Профили яркости телевизионных изображений СВ-синтеза

Здесь очевидна неоднородность температурного поля горения и более быстрое остывание в зонах догорания и кристаллизации,

что обусловлено теплоотводом в направлении, перпендикулярном плоскости горения.

Статистические и энтропийные характеристики различных зон волны горения. Для проверки эффективности энтропийных критериев в обработке телевизионных изображений реакции СВ-синтеза были проведены расчеты для различных зон изображений следующих статистических и энтропийных характеристик: k_1 – среднее значение яркости, k_2 – среднеквадратическое отклонение значений яркости от среднего, k_3 – энтропия, k_4 – энтропийное значение случайной погрешности (энтропийная мощность), k_5 – относительная информационная избыточность.

На рис. 6 приведено изображение полного кадра (а) и того же кадра с выделенными областями (б). На рис. 7 приведена гистограмма распределения яркостей полного кадра (рис. 6(а)).

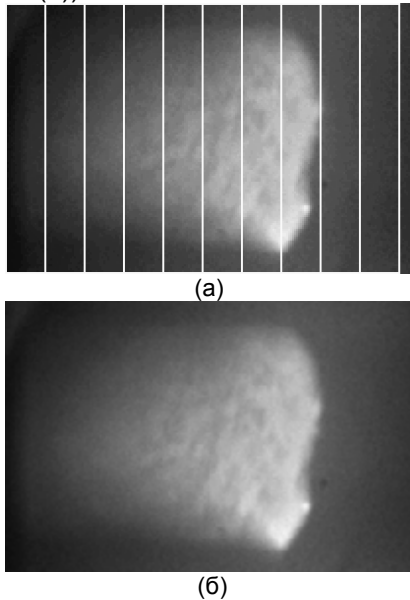


Рис. 6. Изображения реакции СВ-синтеза (а) и областей расчета (б)

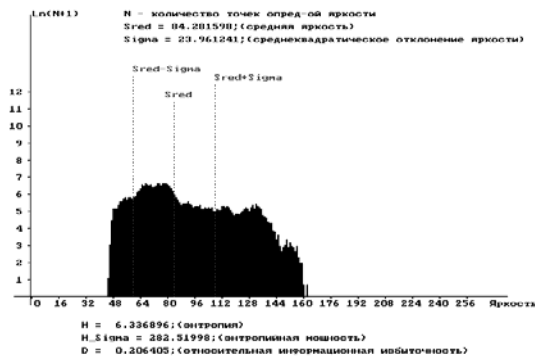


Рис. 7. Гистограмма распределения яркости в изображении ($k_1=84$, $k_2=24$, $k_3=6.336896$, $k_4=283$, $k_5=0.206405$)

На рис. 8 представлены графики характеристик, рассчитанные по десяти равным непересекающимся областям. Значения каждой характеристики выражены в процентах от максимального значения ее выборки.

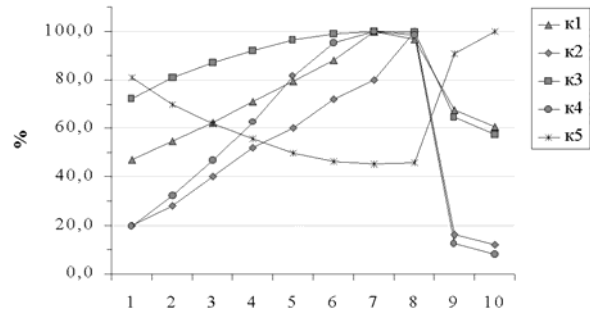


Рис. 8. Статистические и энтропийные характеристики участков изображения

Номера областей (1-10) соответствуют областям, отображенным на рис. 6 (б) в порядке слева направо. Из графиков видно, что все характеристики испытывают экстремум в области фронта реакции. Но в отличие от среднеквадратического отклонения, энтропийные характеристики имеют значения, близкие к экстремальным в области реакции и в области догорания, а не только в области фронта, где, естественно, перепады температуры максимальны.

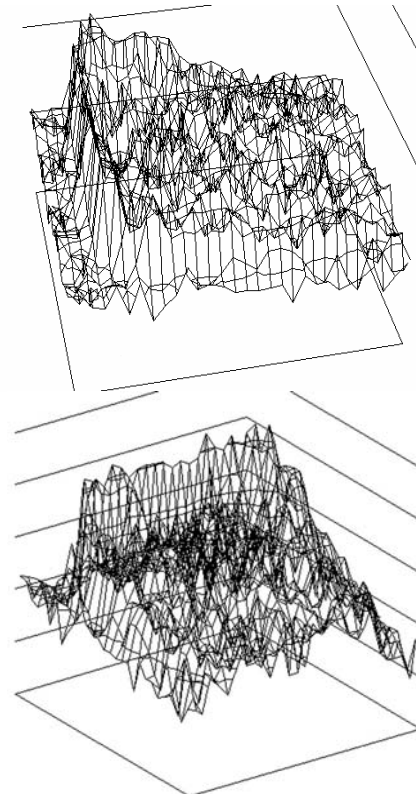
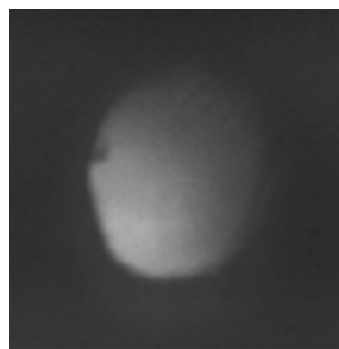


Рис. 9. Энтропийные портреты

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СВС ЭНТРОПИЙНЫМИ МЕТОДАМИ

Значение среднего k_1 отражает усредненный температурный профиль вдоль направления развития реакции. Приведенный выше результат и использование понятия энтропии локальной зоны позволили строить энтропийные портреты изображений (рис. 9). Эти графики рассчитаны по изображению, отраженном на рис. 5. Рассчитывалась энтропия локальных зон в виде квадратов размером 5x5 пикселей. Из рисунков 5 и 9 видно, что формы температурного профиля и энтропийного портрета аналогичны друг другу, что является доказательством эффективности энтропийных методов анализа изображений.

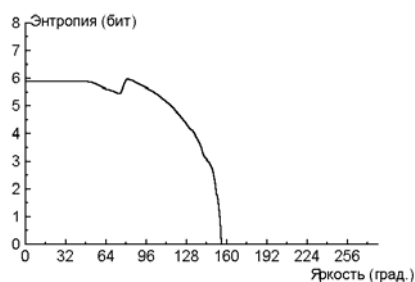
Выделение объектов на изображении по локальным экстремумам функционала «информационного вклада участка яркостей в энтропию». На рис. 10 представлены изображения, полученные: (а) – при съемке СВС согласно схеме на рис. 4; (б) – при съемке СВС через кварцевое стекло; (в) – при съемке СВ-синтеза в режиме теплового взрыва через окно в дверце печи. Эти изображения характеризуются однородностью фона. Выделение объектов обеспечивает функционал «информационного вклада участка яркостей в энтропию» (ФИВУЯЭ) по следующему правилу: согласно формуле (1) при последовательном суммировании информационных вкладов отдельных яркостей в энтропию учитывается та часть гистограммы, яркости которой превосходят заданную пороговую яркость. Значения пороговой яркости последовательно изменяются от 0 до 255.



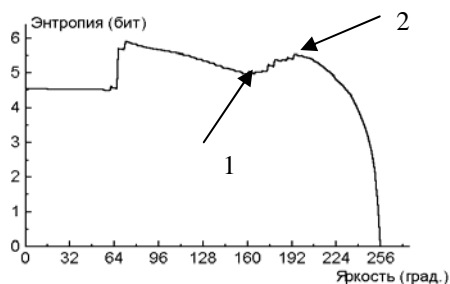
(в)

Рис. 10. Изображения, полученные при съемке СВ-синтеза в различных режимах

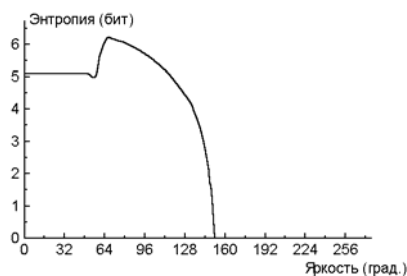
Такой функционал отражает зависимость изменения ФИВУЯЭ по отношению к «емкости выборки (участка)» яркостей. Из графиков зависимости ФИВУЯЭ от пороговой яркости (рис. 11) видно, что для телевизионных изображений различных объектов данная зависимость имеет характерный вид.



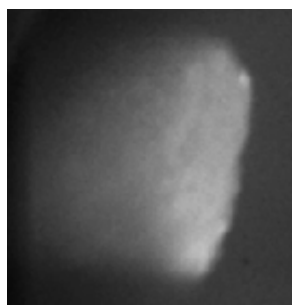
(а)



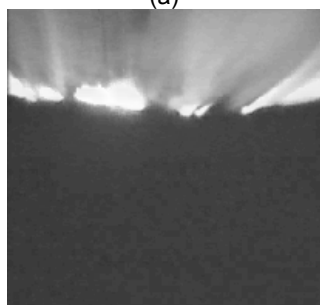
(б)



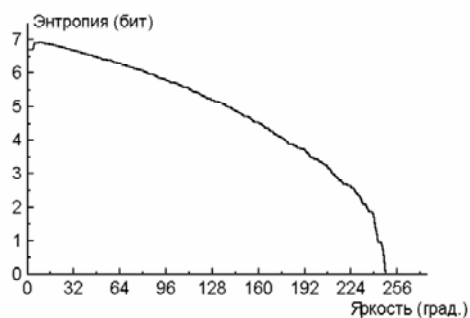
(в)



(а)

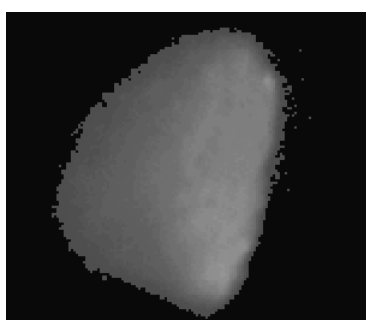


(б)



(г)

Рис. 11. Зависимость функционала ФИВУЯЭ от пороговой яркости



(а)



(б)



(в)

Рис. 12. Участки изображений, выделенные по критерию локального максимума функционала ФИВУЯЭ

На определенных пороговых яркостях наблюдаются локальные минимумы и локальные максимумы, которые соответствуют

даже и меньшим значениям «емкости выборки». Ограничение изображения по этим участкам яркостей позволяет выделить объекты на изображении (рис 12). Таким образом, использование энтропии позволяет найти точку перегиба на яркостном профиле, трудно вычисляемую другими способами.

На графике рис. 11 (б) между точками 1 и 2 наблюдается рост функционала ФИВУЯЭ, который сопровождается наиболее быстрым ростом температуры. На рисунке 13 (а) представлено изображение, соответствующее полному диапазону яркостей (от 1 до максимальной яркости 256), а на рис. 13 (б) – соответствующее участку яркостей между точками локального минимума (1) и локального максимума (2).

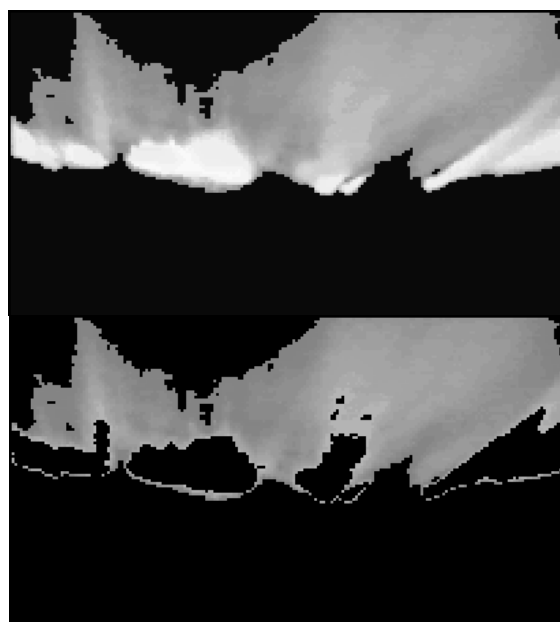


Рис. 13. Участки изображения, выделенные по экстремумам функционала ФИВУЯЭ

Выделение неоднородных объектов на фоне однородного распределения яркостей. Описанный выше метод выделения областей изображения с максимумом функционала ФИВУЯЭ был адаптирован для изображений «яркий неоднородный объект на относительно однородном фоне». Адаптация заключалась в реализации алгоритма поиска отрезка на гистограмме изображения с максимумом функционала ФИВУЯЭ. На рис. 14(а), (г) представлены исходные изображения, на 14 (б), (д) – результаты обработки, на 14 (в), (е) – соответствующие гистограммы (серыми линиями ограничен выделенный отрезок).

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СВС ЭНТРОПИЙНЫМИ МЕТОДАМИ

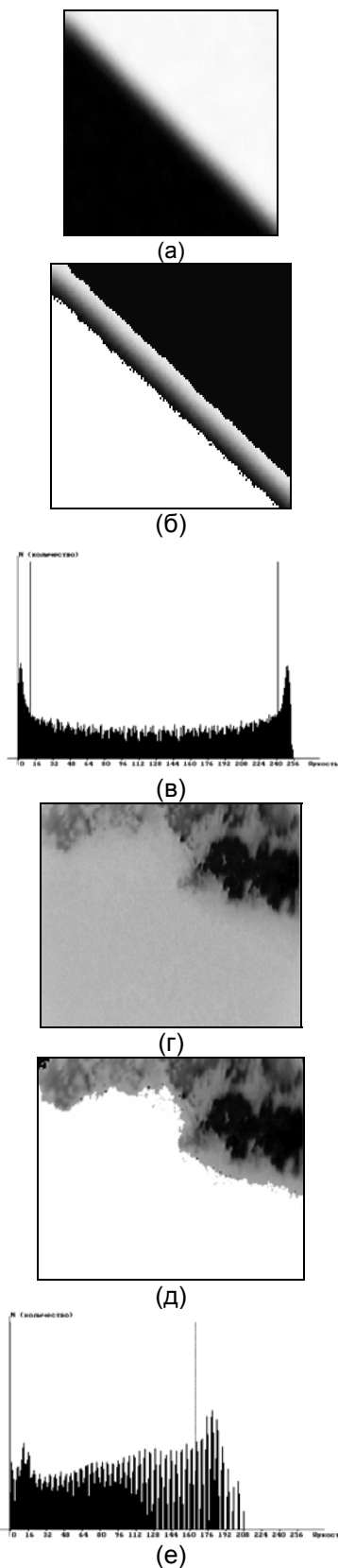


Рис. 14. Выделение неоднородных участков изображений

Сглаживание изображений с учетом характерных апертур шума. Для оценки площадей соответствующих определенным яркостным температурам был реализован соответствующий алгоритм расчета, описанный в [2]. На рисунке 15 представлена яркостная гистограмма, рассчитанная по изображению с рисунка 11(а).

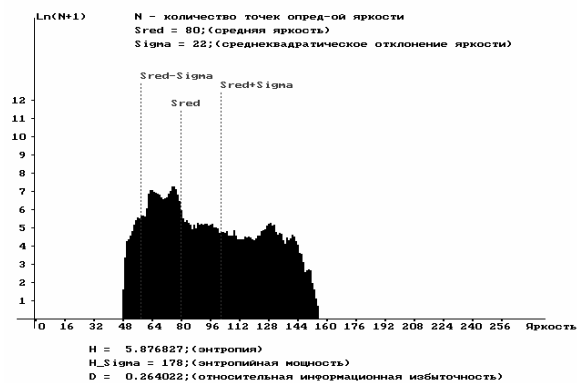
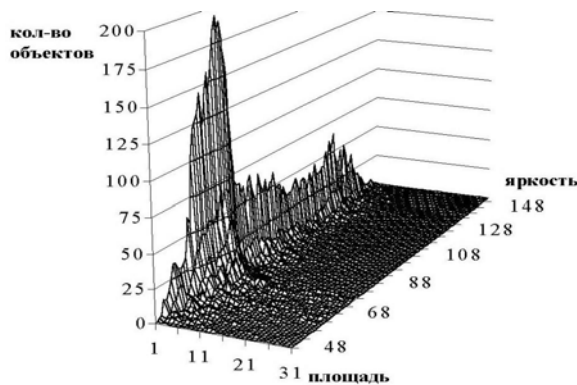


Рис. 15. Гистограмма распределения яркости изображения

На рис. 16 (а) представлено двумерное распределение объектов по площадям и яркостям, а на 16 (б), (в) – гистограммы распределения однопиксельных и двухпиксельных площадей соответственно. При расчете площадей было обнаружено, что форма распределения малых площадей повторяет форму распределения яркости (см. рис. 15, 16). Это обусловлено наличием аддитивного шума, из-за которого изображения изотермических (в пределах разрешающей способности телевизионной цифровой системы) областей размываются в пределах энтропийной случайной погрешности. Изображение (см. на рис. 10 (а)) состоит на 51% из объектов площадью 4 пиксела и меньше. На рис. 16 это наглядно отражено.



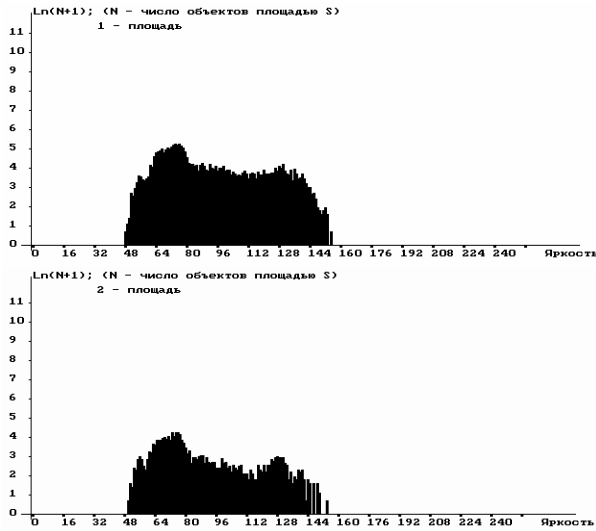


Рис. 16. Распределения выделенных объектов по значениям яркости и площади

Для количественной оценки связанности гистограмм яркости и площади введем следующий параметр:

$$r = 1 - \frac{\sum_i (G_i - S_i)}{\sum_i G_i} \quad (4)$$

где G_i – значения яркостной гистограммы, S_i – значения гистограммы площадей, i – яркость, пробегающая значения от 0 до 255.

Число в знаменателе дроби, по сути, является аналогом площади изображения в пикселах. Сумма объектов определенной площади не может превышать сумму всех пикселей изображения на яркостном срезе, поэтому введенный коэффициент может изменяться в пределах от нуля до единицы. Малые его значения соответствуют слабой связанности гистограмм.

С учетом диапазона площадей от 1 до 100 пиксел из расчетов получено, что значение площади, меньшее 5, соответствует энтропийной оценке погрешности искажений, вносимых аддитивным шумом, т.е. максимальный линейный размер шумовых включений равен трем пикселям. Для устранения таких пространственных искажений была применена медианная фильтрация, которая эффективно удаляют точечные дефекты, сохраняя при этом плавные переходы яркости и границы объектов. Значения параметра r , рассчитанного для того же изображения (радиус апертуры для медианной фильтрации равен трем), для малых площадей сократились, в среднем, в три раза.

Теперь объекты площадью от 1 до 4 пикселей составляют лишь 17% от изображения,

что в три раза меньше чем до сглаживания. То, что в изображении сохранились объекты площадью один или два пикселя объясняется тем, что на перепадах яркости, с линейными размерами порядка апертуры сглаживающего медианного фильтра и выше, фильтр восстанавливает форму этих перепадов. А так как пространственная разрешающая способность ограничена размерами фотоэлементов и возможностями адаптера ввода изображения, то здесь наблюдаются узкие яркостные изолинии. До сглаживания невозможно было выделить тонкие элементы изображения (рис 17(a)).

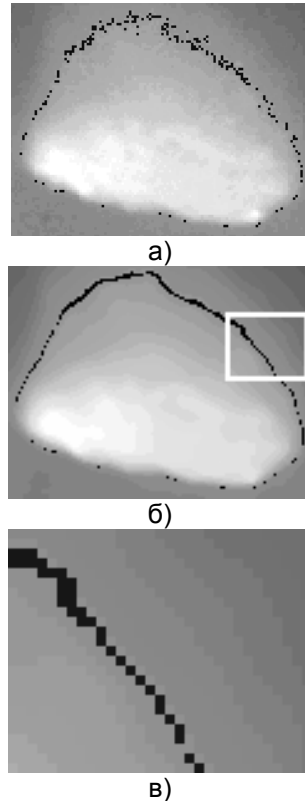


Рис. 17. Выделение яркостных изолиний на изображении

Здесь, выделенные пиксели одинаковой яркости не образуют единую область, хотя и укладываются в некоторую форму. После сглаживания они становятся связанными и непересекающимися с областями, имеющими близкую яркость (рис. 17 (б)). На рис. 17 (в) представлен увеличенный фрагмент с изображения (б). Здесь хорошо видны диагонально и ортогонально связанные пиксели.

Для контроля сглаживаемого шума рассчитывались параметры разности исходного и полученного изображений. На рисунке 18 представлена гистограмма шума, изображе-

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СВС ЭНТРОПИЙНЫМИ МЕТОДАМИ

ние которого получено путем вычитания из исходного изображения его же сглаженного варианта (по яркости искусственно задано смещение на пятьдесят градаций).

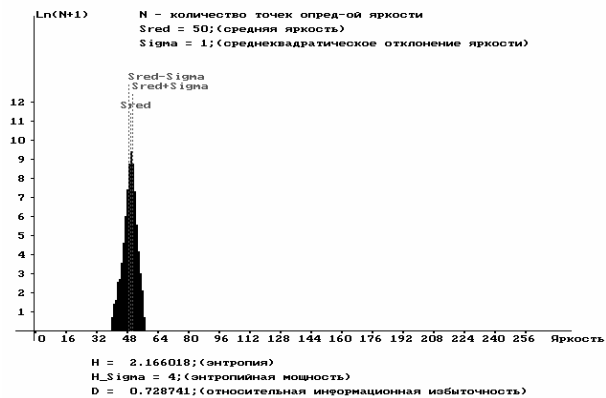
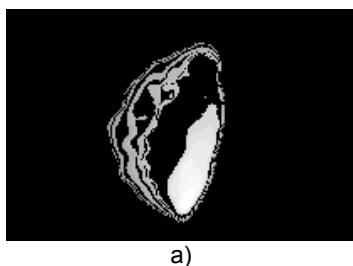


Рис. 18. Гистограмма шума, вычтенного при сглаживании

Среднеквадратическое отклонение и энтропийные характеристики полученного изображения очень близки к характеристикам темнового шума, что подтверждает объективность полученной по площадям оценки.

Выделение изолиний по правилу сохранения максимума функционала ФИВУЯЭ. Для выделения на тепловом изображении областей с большими и малыми изменениями яркости был реализован алгоритм препарирования [2], основанный на упорядочивании по убыванию значений функционала ФИВУЯЭ исходного изображения. Затем из изображения вырезались яркости так, что энтропия оставшейся части изображения остается максимальной. На рис. 19 (а), (в), (д) представлены результаты такого препарирования. Здесь сохранены области изображения, в которых происходит быстрое изменение яркости. На рис. 19 (б), (г), (е) представлены результаты, полученные, напротив, путем вырезания областей, которые вносили максимальный вклад в энтропию. Из рис. 19 видно, что фронт волны горения изгибается и имеет форму близкую к части эллипса.



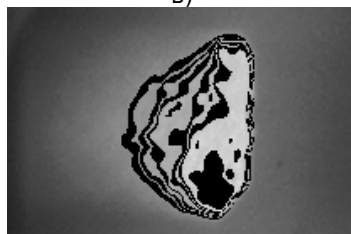
а)



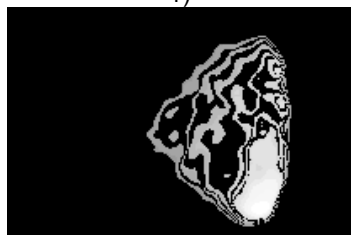
б)



в)



г)

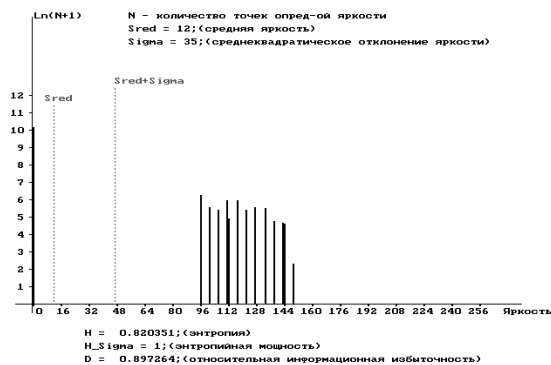


д)



е)

Рис. 19. Наиболее информативные области на изображении



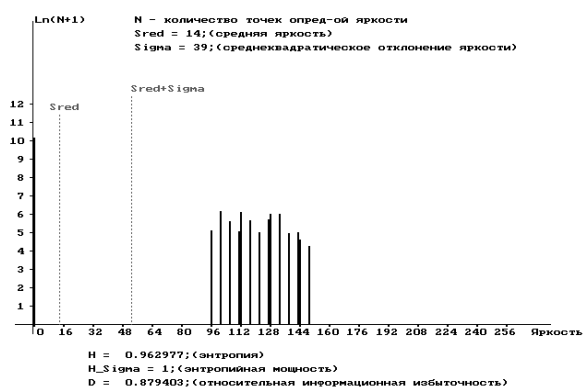


Рис. 20. Гистограммы препарированных изображений

Эффекты на краях, связанные с теплоотводом в стенку, присутствуют всегда, в то время как посередине наблюдаются изменения формы. На рис. 19 (в), (г) большая часть фронта прямолинейна. Таким образом, естественно полагать, что скорости фронта в середине канала горения и по краям изменяются. На рис. 20 изображены гистограммы изображений 19 (в), (д) (слева направо соответственно).

Здесь наглядно видно, что прореживание гистограммы происходит отдельными участками. На практике наблюдались и разрывы фронта, но и в этом случае, закономерности формирования формы фронта сохраняются (рис. 21).

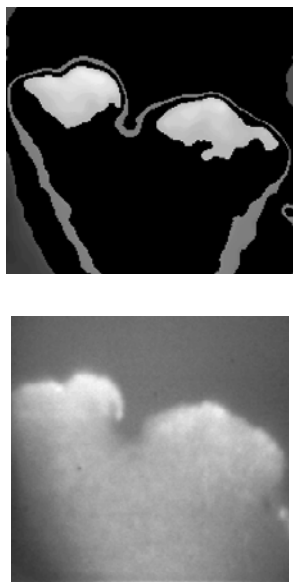


Рис. 21. Разрыв фронта реакции

Здесь роль краевого теплоотвода играет смесь реагентов.

Таким образом, рассмотренный режим горения с теплоотводом на краях носит универсальный характер. Экспериментальные исследования показывают, что математическая модель такого горения адекватна не только в случае сплошного фронта, но и тогда, когда фронт распадается на участки, в которых сохраняются те же закономерности распределения тепла.

Определение эффективной скорости распространения волны горения в процессе СВС. На рис. 22 представлены шесть кадров развития реакции СВС (кадры взяты из последовательности 26-ти кадров, через пять).

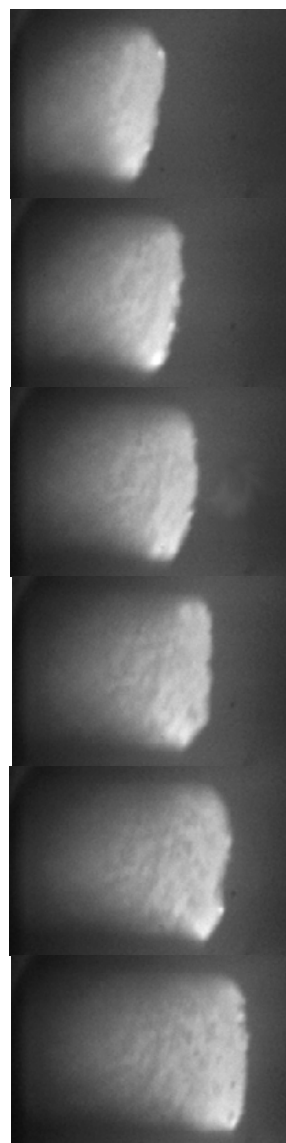


Рис. 22. Развитие реакции СВС

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СВС ЭНТРОПИЙНЫМИ МЕТОДАМИ

Для вычисления скорости распространения волны горения по перемещению центра яркости изображения требуется на каждом кадре выделить зону реакции, которая состоит из хаотически расположенных микроочагов горения. Энтропия изображения является мерой ее неоднородности. Поэтому в качестве признака равенства зон реакции, в различные моменты времени, необходимо анализировать максимум близости их энтропий. Как было показано в [2], аддитивный шум не влияет на положение координат центра яркости. В общую энтропию, энтропия шума входит также аддитивно. Поэтому для выделения зоны реакции и нахождения центра яркости полученного объекта, сглаживание изображения не требуется.

На основе вышеприведенных положений были рассчитаны координаты центра яркости, расстояния между соседними центрами и их скорости для последовательности 26-ти кадров. Расстояние L между центрами яркости на последовательных кадрах рассчитывается по формуле:

$$L = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}, \quad (5)$$

где i – номер кадра. Скорость движения волны горения для последовательных пар кадров рассчитывается по формуле:

$$V = L \cdot d \cdot f, \quad (6)$$

где d – размер пикселя в мм, f – частота кадровой записи изображений.

Регистрация СВС, при которой были получены изображения (рис. 22), проводилась с частотой 15 кадров в секунду. Размер пикселя на этих изображениях составляет 80 мкм. Средняя скорость в результате расчетов оказалась равна 3,15 мм/с.

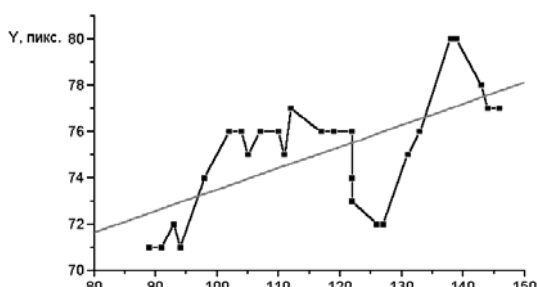


Рис. 23. Траектория центра яркости изображений зоны реакции СВС

Для анализа полученных данных были построены графики. Во-первых, проанализируем траекторию движения волны горения. Для этого анализируем график для траекто-

рии центра яркости изображений зоны реакции СВС (рис. 23). Как координаты центра яркости изменяются на реальном изображении, дает представление рис. 24.

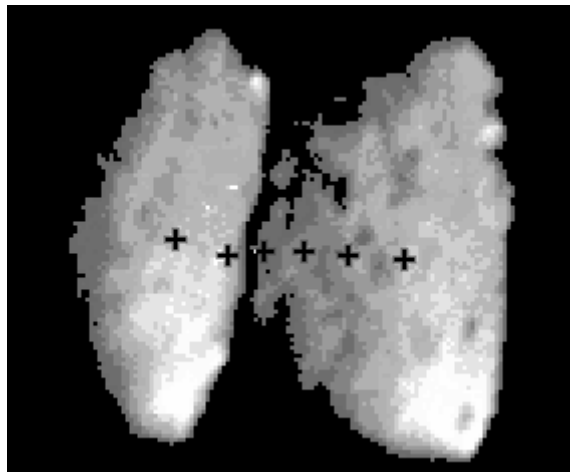


Рис. 24. Иллюстрация движения центра яркости (крестиками выделены центры яркости начального, конечного и четырех промежуточных кадров)

На рис. 23 серым цветом отображен график линейной регрессии, для которой тангенс угла наклона прямой равен 0,0926, что соответствует $5,29^\circ$. Наличие такого наклона вызвано неточной установкой камеры относительно ванночки со смесью реагентов, но описанная методика не чувствительна к таким погрешностям. С помощью вышеуказанной методики можно оценить нестабильность развития реакции в направлении, перпендикулярном движению фронта. По результатам расчета, стандартное отклонение от линии регрессии составило 2 пикселя (т.е. 160 мкм). Из графика также видно, что горение проходило неравномерно относительно оси симметрии реакции. Центр яркости колеблется относительно линии регрессии, т.е. в процессе горения локальные очаги, смещенные ближе к одному из краев ванночки, возникали не одновременно, а сменяя друг друга. Горение раскачивалось от одного края к другому, но величина таких колебаний невелика.

Теперь проанализируем изменение скорости и логарифма яркости, который прямо пропорционален изменению температуры в процессе протекания реакции. На рис. 25 представлены графики, где скорость отложена в реальном масштабе в мм/с, а яркость в пикселях, минус положительная константа. Отсчеты яркости соответствуют тому уровню,

на котором выделились объекты на различных кадрах при равных энтропиях. Таким образом, увеличение этой яркости соответствует тому, что при той же вероятностной структуре зоны реакции, что и на других кадрах, температура возрастает. Уменьшение, соответственно, связано с уменьшением температуры в зоне реакции. С этим согласуется и изменение скорости, увеличение которой совпадает с увеличением температуры.

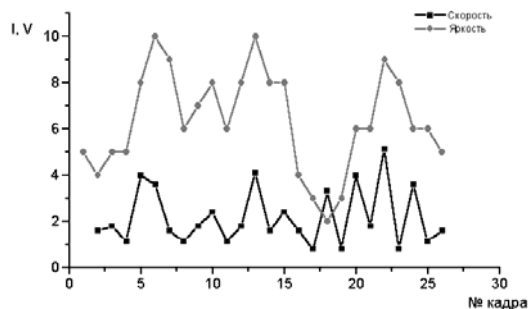


Рис. 25. Графики скорости распространения волны горения и температуры в СВС

Выводы. Использование энтропии позволило выделять зону реакции как объект и рассчитывать скорость ее продвижения. Анализ изменения координат центра яркости показал нестабильность развития реакции в направлении, перпендикулярном каналу горения.

Преимуществами определения скорости распространения волны горения через центр яркости являются независимость от направления распространения реакции и отслеживание изменений скорости в процессе горения. Исследована взаимосвязь скорости движения волны горения и ее температуры. Скорость и температура зоны реакции изменяются сонаправленно, что соответствует теоретической модели горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. - М.: Радио и связь, 1986.-304 с., ил.
2. Полторыхин М.В. Автоматизированные комплексы анализа тепловых изображений процессов горения и детонации энтропийными методами: Дисс-ия на соискание ученой степени к.т.н.-Барнаул.-2005.-158 с.
3. Шеннон К.Э. Математическая теория связи.// Работы по теории информации и кибернетики. - М.: Изд-во Иностранная литература, 1963. - 830 с.
4. Иордан В.И., Гуляев П.Ю. Основы теории информации и кодирования: Учеб. пособие. - Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2004.-220 с., ил.
5. Новицкий П.В., Зograf И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. - Л.: Энергоатомиздат, 1985.-248 с., ил.