

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОБМЕН ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ГРАФИТА

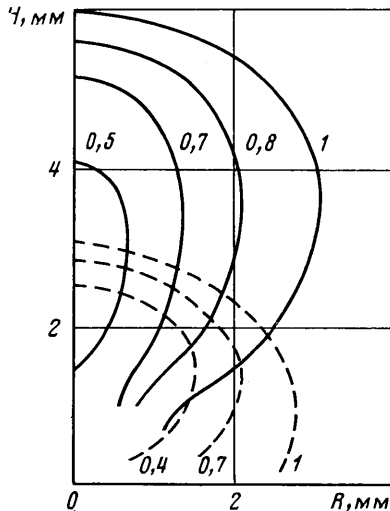
ГАЛКИН А. М., КОРОБЕЙНИКОВ В. П., НАГОРНОВ В. И., СЫСОЕВ Н. Н., ШУГАЕВ Ф. В.

Экспериментально и с помощью математического моделирования исследуются газодинамические и тепловые процессы, развивающиеся вблизи поверхности графита после окончания воздействия на нее импульса лазерного излучения длительностью 20 нс, энергией $E \approx 0,1-1$ Дж и длиной волны 0,6943 мкм. Рассматриваются такие времена после его окончания, когда ударная волна вырождается в звуковую. Приводятся типичные профили плотности по осевому сечению неоднородности для различных моментов времени. Отмечается, что скорость подъема тепловой неоднородности значительно выше скорости свободной конвекции. Путем численного решения системы двумерных уравнений Навье-Стокса детально изучены процессы происходящего конвективного теплообмена. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Воздействие мощного лазерного излучения на поверхность твердой поглощающей преграды приводит к образованию плазмы [1]. Газодинамические процессы, сопровождающие расширение плазмы в атмосферный газ после окончания лазерного импульса, во многом напоминают взрыв. В экспериментах «лазерный взрыв» создавалась регистрация процесса осуществлялась теневым и интерферометрическим методами. Путем фокусировки импульса излучения рубинового лазера на плоскую поверхность графита. Диаметр пятна фокусировки излучения составлял около 500 мкм. Эксперименты проводились в воздухе при начальном давлении $p_0 \approx 0,1-1$ атм. Ре-Источником света служил моноимпульсный лазер, длительность импульса составляла 20 нс. Синхронизация работы обоих лазеров осуществлялась шестикальным генератором ГИ-1. Энергия лазерных импульсов измерялась прибором ИМО-2Н.

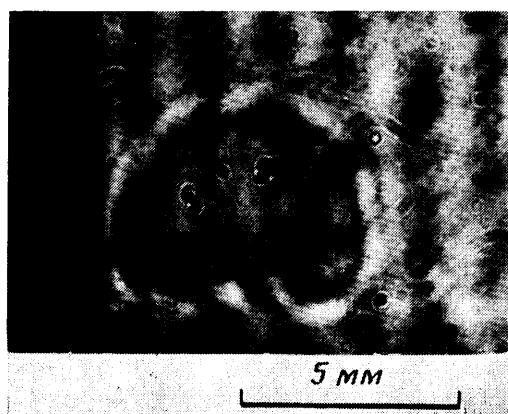
Эксперименты показывают, что после ухода ударной волны на значительные расстояния от центра взрыва (времена после окончания лазерного импульса $t \gtrsim \gtrsim 100$ мкс) неоднородная область нагретого газа удаляется от твердой поверхности и изменяет свою форму.

Восстановленные из интерферограммы профили плотности по осевому сечению неоднородной области для моментов времени $t=20$ и 1,4 мс ($E \approx 0,4 \pm 0,1$ Дж) приведены на фиг. 1 штриховыми и сплошными кривыми соответственно. Относительная ошибка измерений при обработке интерферограмм с помощью обращенного интеграла Абеля составила около 20%.



Фиг. 1

Из экспериментальных данных видно, что в момент времени порядка 10 мкс расширение нагретой области газа заканчивается. Давление внутри неоднородности становится приблизительно равным давлению в невозмущенном газе. По известному распределению плотности газа можно найти распределение температуры. Температура в центре нагретой области при $t \sim 10$ мкс составляет свыше 3500 К. Под воздействием излучения от нагретого газа происходит испарение графита. Это явление и другие процессы в зоне нагрева приводят к возникновению массового импульса, распространяющегося (фиг. 2) со скоростью, значительно превышающей скорость естественной конвекции, и ортогонального к плоскости твердой поверхности.



Фиг. 2

Для детального исследования изучаемых явлений используется математическое моделирование, основанное на численном решении системы дифференциальных уравнений.

Математическая модель, описывающая процессы происходящего конвективного теплообмена, строится на основе системы упрощенных (плотность не зависит от давления) двумерных уравнений Навье – Стокса для сжимаемого теплопроводного газа [2]. Выбор модели обоснован, так как к моменту начала моделирования ($t=20$ мкс) ударная волна вышла из расчетной области, давление в объеме выровнилось, а скорость движения газа существенно меньше скорости звука. К системе уравнений добавляется двумерное уравнение теплопроводности для графита с условием сопряжения температуры на поверхности. Использование более точного условия равенства тепловых потоков затруднительно потому, что неизвестен коэффициент теплообмена на границе «графит – нагретый газ». В уравнении энергии для газа учитываются потери тепла за счет излучения. Вследствие малости оптической толщины используется приближение объемного высвечивания.

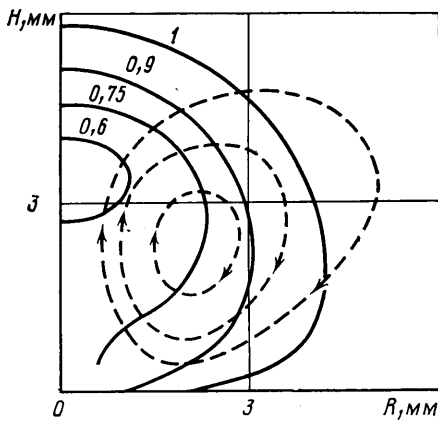
Отметим, что процесс естественной конвекции (подъем термика) из-за небольших характерных масштабов хорошо описывается ламинарной моделью. Однако в исследуемой задаче начальные значения скорости газа у поверхности на два порядка больше скорости естественной конвекции, поэтому в уравнениях движения и теплопроводности учитывалась турбулентная вязкость, определяемая из [3] по формуле для осесимметричных струй. В расчетах не учитывается испарение графита под действием собственного излучения нагретого газа, так как влияние процесса на теплообмен незначительно вследствие быстрого охлаждения нагретого объема. Учет влияния этого эффекта на начальном периоде конвекции ($t \approx 20$ мкс) проводится с помощью задания величины массового импульса.

В начальный момент времени задаются распределения температуры, плотности и поле скоростей газа. На открытых границах выставляются «мягкие» условия экстраполяционного типа. Для численного решения системы дифференциальных уравнений применялась явная разностная схема [4] с последующей коррекцией потоковых величин.

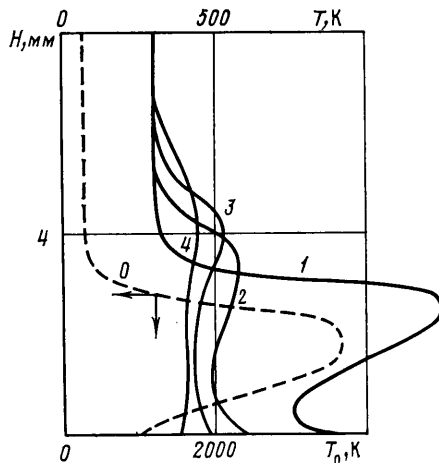
Численные расчеты проведены для характерного масштаба 3 мм, максимальной температуры газа до 6000 К, температуры поверхности пластины 900 К. За характерную скорость выбиралась скорость свободноконвективного движения, равная 0,16 м/с. На фиг. 1 штриховыми линиями приведено распределение плотности газа по пространству, которое выбиралось за начальное. Значения температуры обратно пропорциональны значениям плотности. Максимальная скорость у поверхности пластины при $t=20$ мкс достигала значения 60 м/с. Данная скорость соответствует, согласно [5], температуре около 6000 К. Мощный начальный импульс приводит к подъему нагретой области, что наблюдается и при физическом эксперименте.

Скорость движения газа V быстро падает:

t ,	мс	0,05	0,2	0,3	1	2
V ,	м/с	10	4,8	3,3	2,3	1,4
H ,	мм	3,9	4,5	5,2	6,2	6,8
H^* ,	мм	$3,2 \pm 0,3$	$4,8 \pm 0,3$	$5,8 \pm 0,3$	$6,4 \pm 0,3$	$6,7 \pm 0,3$



Фиг. 3



Фиг. 4

и через 3 мс ее максимальное значение равно 1,2 м/с. В свою очередь скорость подъема термика также уменьшается, приближаясь к своему асимптотическому значению. Вычисленное расстояние от верхней границы нагретого объема газа до поверхности графита в зависимости от времени удовлетворительно согласуется с результатами измерений H^* .

В центральной части нагретой области образуется тороидальный вихрь, центр которого расположен немного ниже области с максимальной температурой. На фиг. 3 изображены изолинии плотности газа и функции тока (помечены стрелками) в момент времени $t=1,5$ мс.

Представляет интерес выяснение механизма теплообмена между воздухом и графитом. Так, вначале температура газа над пластиной значительно больше температуры на поверхности. Но уже через 0,2 мс вследствие конвективного теплообмена с холодным воздухом температура газа становится меньше температуры поверхности пластины. За счет этого возникает поток тепла от твердого тела к прилегающим массам воздуха. На фиг. 4 (кривые 0-4) изображено распределение температуры на оси симметрии в моменты времени $t=0; 0,2; 1,1; 2; 3$ мс.

Таким образом, измерено распределение плотности внутри нагретого газа и движение нагретой области. Скорость подъема тепловой неоднородности оказывается значительно выше скорости свободной конвекции. Полученные результаты численных расчетов детально описывают процесс конвективного теплообмена и удовлетворительно согласуются с данными эксперимента. Это предполагает возможность применения построенной математической модели для решения различных практических задач, связанных с использованием лазерной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения: Пер. с англ. М.: Мир, 1974. 468 с.
2. Ramshaw J. D., Trapp J. A. A numerical technique for low-speed homogeneous two-phase flow with sharp interfaces // J. Comput. Phys. 1976. Vol. 21. № 4. P. 438-453.
3. Шеу Дж. Турбулентное течение: Процессы вдува и перемешивания: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 247 с.
4. Ривард У., Барлер Т., Фармер О. Нестационарные турбулентные течения химически реагирующих газовых смесей // Численное решение задач гидромеханики. М.: Мир, 1977. № 14. С. 184-193.
5. Allen F. J. Surface temperature and disposition of beam energy for a laser-heated target // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. № 8. P. 3145-3149.

Кемерово
Москва

Поступила в редакцию
8.X.1987