

УДК 621.315.592

## ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ НАГРЕВА ПЛАСТИНЫ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АМГ-6 НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ПРОГРАММНОМ МОДУЛЕ "ЛОГОС ТЕПЛО"

А. Э. Запонов

(ВА РВСН им. Петра Великого, г. Балашиха Московской области)

Одной из задач, предваряющей использование математического моделирования при разработке современных летательных аппаратов, является валидация нагрева пластины из алюминиевого сплава АМГ-6 непрерывным лазерным излучением. Моделирование нагрева пластины выполнено в модуле "Логос Тепло" пакета программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования "Логос". Проведено сравнение полученных расчетных данных с известными экспериментальными данными. В результате валидации установлено, что максимальная относительная погрешность максимальной температуры тыльной поверхности пластины в процессе воздействия на пластину лазерного излучения не превысила  $\approx 15\%$ .

*Ключевые слова:* компьютерное моделирование, лазерное излучение, нагрев, металл.

### Введение

При движении с гиперзвуковыми скоростями корпус современного летательного аппарата (ЛА) испытывает воздействие интенсивных неравномерных тепловых потоков, в результате чего происходит нагрев корпуса и внутренних элементов ЛА. С целью обеспечения требуемых температурных режимов функционирования ЛА на этапе разработки при обосновании рациональной конструкции корпуса решается задача оптимизации по критерию *масса—температура—цена*. В связи с тем, что в настоящее время накладываются временные ограничения на сроки разработки новых ЛА, критерий оптимизации также должен учитывать и временные затраты. Обоснование рациональной конструкции корпуса ЛА с учетом ограничений по времени и материальным затратам возможно только расчетно-экспериментальными методами. Поскольку корпус ЛА имеет сложную конструкцию, математическое моделирование его нагрева проводят методом конечных объемов с использованием различных пакетов программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования. Одним из таких пакетов является "Логос" [1] разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров Ниже-

городской области), в состав которого входит, в частности, модуль "Логос Тепло" [2]. Данный пакет программ выбран по ряду причин:

- данное программное обеспечение — отечественного производства и сертифицировано для использования в государственных учреждениях Российской Федерации;
- графический интерфейс и возможность автоматического построения расчетной сетки позволяют упростить процесс создания модели для дальнейшего моделирования;
- имеется возможность распараллеливания алгоритмов и использования высокопроизводительных и супер-ЭВМ для уменьшения времени расчетов.

Однако перед тем как использовать математическое моделирование при разработке новых ЛА, необходимо выполнить одно из требований [3] к математической модели, которое заключается в ее валидации. Валидация математической модели — подтверждение ее адекватности моделируемому объекту, т. е. необходимо подтвердить расчетные данные результатами эксперимента.

Для моделирования высокоинтенсивных неравномерных тепловых потоков в лабораторных условиях широко применяются лазерные

установки. Экспериментальному исследованию взаимодействия интенсивного лазерного излучения (ЛИ) с различными конструкционными материалами посвящено множество работ, в частности [4–6].

Целью настоящей работы является валидация модели нагрева пластины из алюминиевого сплава АМг-6 непрерывным ЛИ в модуле "Логос Тепло". Валидация модели проводится на основе данных, полученных в работе [6], так как в ней проведено исследование с различными значениями средней плотности мощности, радиуса пятна и длительности воздействия ЛИ, а также измерено распределение плотности мощности ЛИ в пятне. Таким образом, в [6] имеется наибольшее количество исходных данных для проведения корректного математического моделирования. В указанных исследованиях определялся нагрев тыльной поверхности пластины из алюминиевого сплава АМг-6 непрерывным ЛИ при различных режимах воздействия, с обдувом воздушным потоком и без него.

Исходя из цели настоящей работы сформированы частные задачи исследования:

- 1) разработка модели нагрева пластины из алюминиевого сплава АМг-6 непрерывным ЛИ в модуле "Логос Тепло";
- 2) проведение компьютерного моделирования нагрева пластины из АМг-6 непрерывным ЛИ при различных значениях плотности мощности и длительности облучения с учетом обдува воздушным потоком и без него в модуле "Логос Тепло";
- 3) сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, анализ полученных результатов.

### Модель нагрева пластины

Из анализа работы [6] следует, что объектом экспериментальных исследований являлась пластина из алюминиевого сплава АМг-6 длиной и шириной 20 см, толщиной 0,2 см. После создания трехмерной модели пластины указанных геометрических размеров в генераторе регулярной объемной сетки была построена расчетная сетка, состоящая из 1 000 000 ячеек (по 100 ячеек в каждом направлении).

В расчетах моделировалось воздействие на геометрический центр пластины непрерывным ЛИ с длиной волны 1,07 мкм и гауссовым распределением энергии в сечении пучка с различными

значениями радиуса пятна, при обдуве воздушным потоком и без него.

В качестве начальных условий принято равномерное распределение температуры в пластине  $T_0 = 293$  К.

В качестве граничных условий на верхней (облучаемой ЛИ) поверхности пластины заданы:

- 1) тепловой поток, с помощью которого моделируется воздействие непрерывного ЛИ с требуемыми значениями плотности мощности и длительности с учетом коэффициента поглощения материала. Так как экспериментальные исследования проводились при гауссовом распределении плотности мощности ЛИ в пятне воздействия, то в расчетах тепловой поток  $q(r)$  задавался в "Редакторе формул" [1] следующей зависимостью:

$$q(r) = Akq_{\text{ср}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-r^2/(2\sigma^2)},$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2},$$

где  $r$ ,  $x$ ,  $y$  — радиус и координаты относительно центра пластины;  $A$  — коэффициент отношения максимального и среднего значений плотности мощности ЛИ ( $A = 2,3$  [6]);  $q_{\text{ср}}$  — среднее значение плотности мощности ЛИ в пятне воздействия;  $\sigma$  — параметр, описывающий зависимость плотности мощности ЛИ от расстояния до центра пятна воздействия, значение которого зависит от радиуса пятна;  $k$  — коэффициент поглощения ЛИ пластиной из АМг-6 ( $k \approx 0,3$  [6]).

Распределения плотности мощности ЛИ в экспериментальных и расчетных (методом конечных объемов) исследованиях на поверхности пластины с учетом коэффициента поглощения материала и их двумерная визуализация для пятна воздействия ЛИ радиусом  $r_{\text{эф}} = 1,22$  см при среднем значении плотности мощности в пятне  $q_{\text{ср}} = 190$  Вт/см<sup>2</sup> показаны на рис. 1;

- 2) конвективный теплообмен для расчетов с учетом обдува воздушным потоком. Коэффициент  $K$  теплообмена с окружающей средой зависел от скорости обдува, а температура окружающей среды составляла  $T_e = 293$  К.

Граничные условия для остальных поверхностей пластины задавались как *теплоизолированная стенка*.

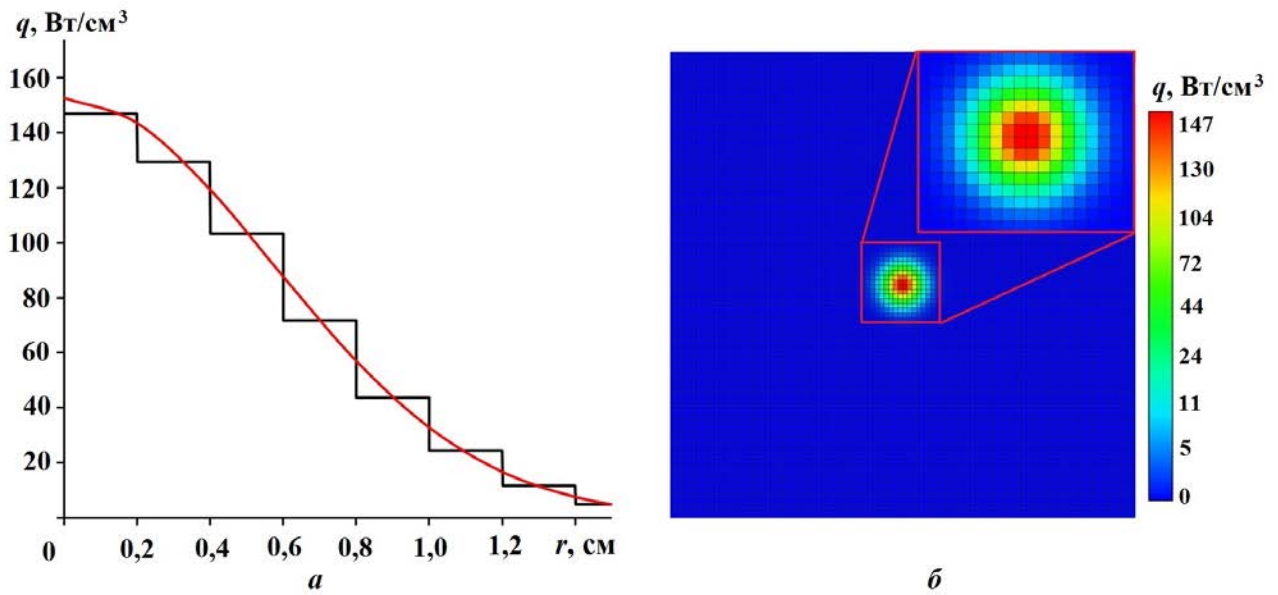


Рис. 1. Распределения плотности мощности излучения на поверхности пластины в экспериментальных (—) и расчетных (— — конечно-ячеечная аппроксимация) исследованиях (а) и их двумерная визуализация (б)

Плотность материала АМг-6 составляла  $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$  [7], коэффициенты теплопроводности  $\lambda(T)$  и теплоемкости  $c(T)$  аппроксимировались линейными зависимостями от температуры на основе данных из [7] с коэффициентом аппроксимации  $\approx 0,98$ :

$$c(T) = 0,554T + 877;$$

$$\lambda(T) = 0,0373809562T + 240,083335147.$$

### Результаты моделирования

В результате компьютерного моделирования в модуле "Логос Тепло" получены графические представления эволюции температурного поля пластины из алюминиевого сплава АМг-6 в результате воздействия на нее ЛИ при различных значениях плотности мощности, радиуса пятна и длительности облучения, при обдуве воздушным потоком и без него. Термограммы нагрева лицевой поверхности пластины при различных режимах воздействия на нее ЛИ показаны на рис. 2, 3.

На рис. 4, 5 показаны графики зависимостей максимальной температуры тыльной поверхности пластины (за центром пятна воздействия ЛИ) исследуемой пластины от времени при длительности воздействия 10 с со средней плотностью мощности в пятне  $q_{\text{ср}} = 190 \text{ Вт/см}^2$  и различных радиусах пятна без обдува воздушным

потоком. Здесь и далее на рисунках одинарной сплошной линией показаны расчетные данные, а двойной, полой внутри, — экспериментальные из работы [6].

На рис. 6 показаны зависимости максимальной температуры тыльной поверхности пластины от времени при радиусе пятна  $r_{\text{эф}} = 1,6 \text{ см}$  с различной длительностью воздействия ЛИ, с обдувом воздушным потоком и без него.

### Обсуждение результатов

Из анализа рис. 4–6 следует, что значения максимальной температуры тыльной поверхности пластины, полученные в результате расчетов, удовлетворительно совпадают с соответствующими значениями, полученными экспериментально, на временном интервале, характеризующем нагрев пластины.

Однако на временном интервале остывания пластины получено отклонение расчетных данных от экспериментальных для всех расчетных случаев. Важно отметить, что расчетная максимальная температура тыльной поверхности пластины уменьшается быстрее, чем в экспериментах, причем расхождение расчетных и экспериментальных данных увеличивается со временем.

Для проверки адекватности разработанной модели нагрева пластины из алюминиевого сплава АМг-6 непрерывным ЛИ с учетом обдува воз-

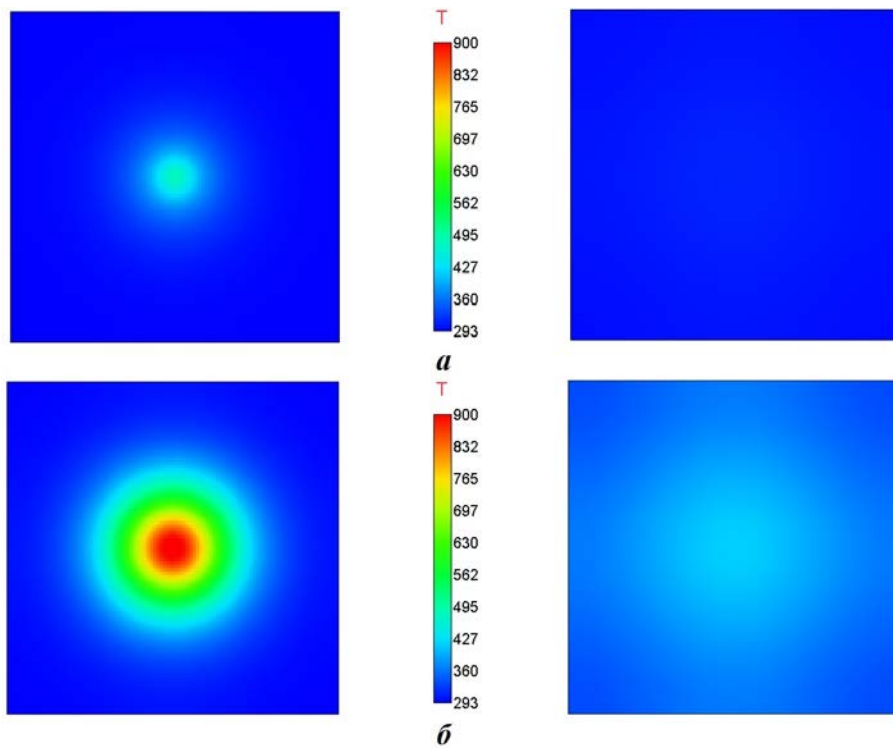


Рис. 2. Термограммы нагрева лицевой поверхности пластины на два момента времени (слева —  $t = 10$  с; справа —  $t = 30$  с) при среднем значении плотности мощности излучения в пятне  $q_{\text{ср}} = 190 \text{ Вт/см}^2$  с различным радиусом пятна  $r_{\text{эф}}$ : а —  $r_{\text{эф}} = 1,02$  см; б —  $r_{\text{эф}} = 2,87$  см

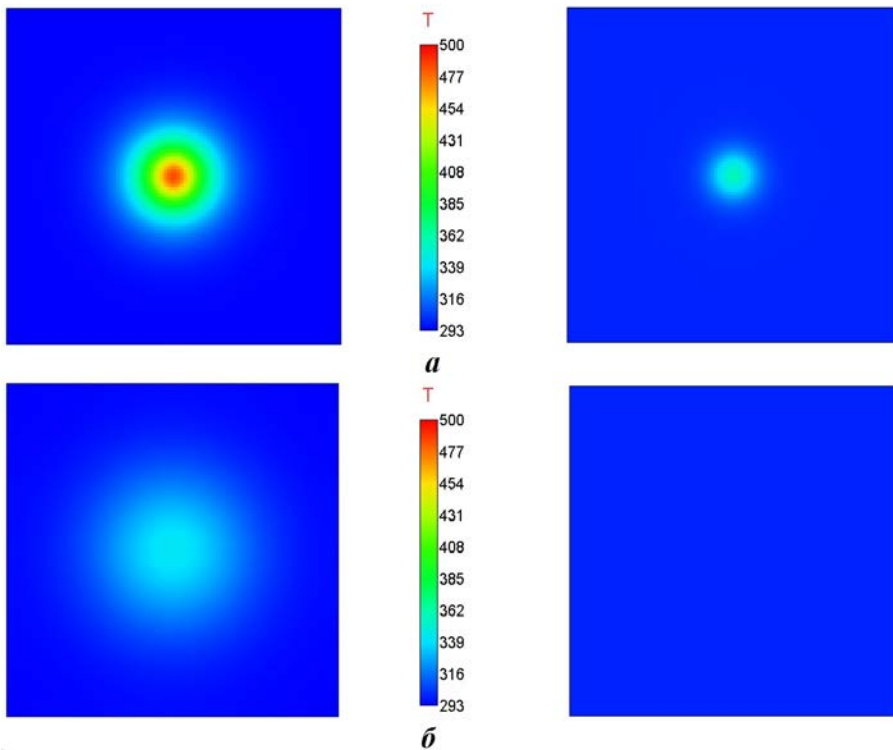


Рис. 3. Термограммы нагрева лицевой поверхности пластины без обдува (слева) и с обдувом (справа) при радиусе пятна воздействия ЛИ  $r_{\text{эф}} = 1,6$  см и среднем значении плотности мощности излучения в пятне  $q_{\text{ср}} = 150 \text{ Вт/см}^2$ : а —  $t = 5$  с; б —  $t = 10$  с

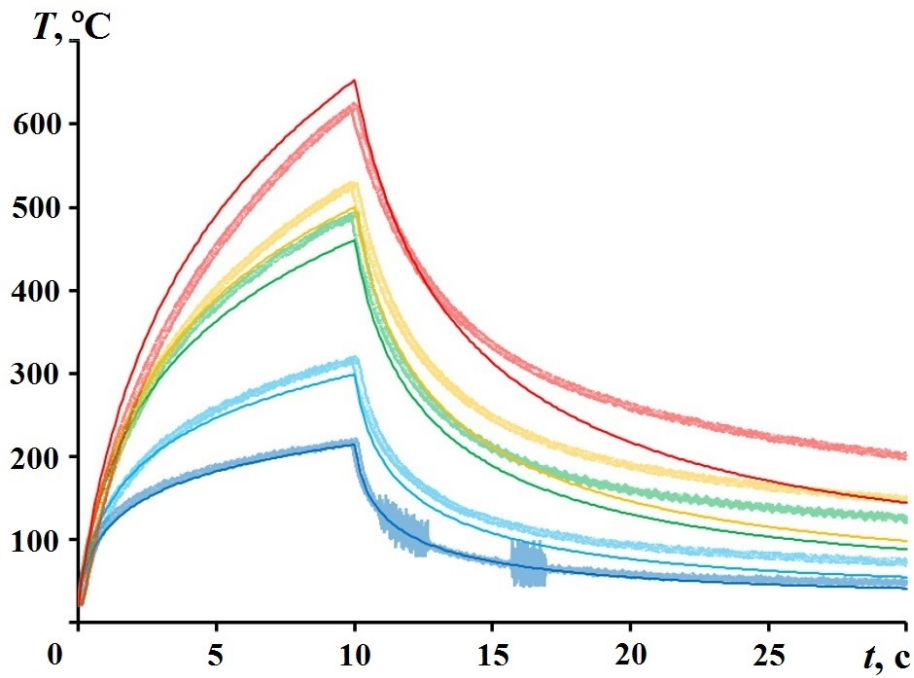


Рис. 4. Зависимости от времени максимальной температуры тыльной поверхности пластины при длительности воздействия ЛИ 10 с со средней плотностью мощности в пятне  $q_{ср} = 190 \text{ Вт/см}^2$  и различных радиусах пятна без обдува воздушным потоком: —  $r = 1,02 \text{ см}$ ; —  $r = 1,5 \text{ см}$ ; —  $r = 2,1 \text{ см}$ ; —  $r = 2,28 \text{ см}$ ; —  $r = 2,87 \text{ см}$

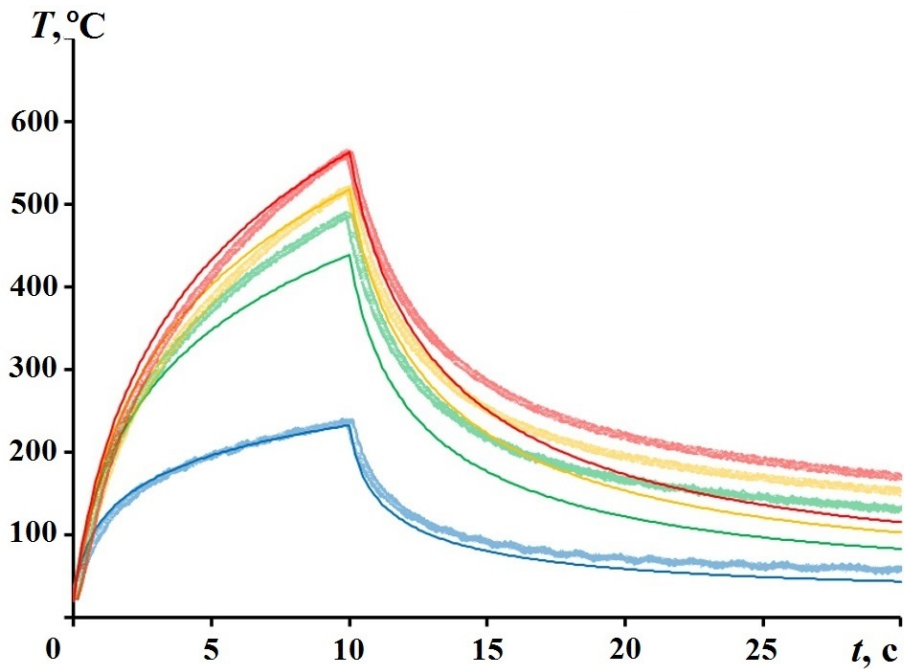


Рис. 5. Зависимости от времени максимальной температуры тыльной поверхности пластины при длительности воздействия ЛИ 10 с со средней плотностью мощности в пятне  $q_{ср} = 190 \text{ Вт/см}^2$  и различных радиусах пятна без обдува воздушным потоком: —  $r = 1,22 \text{ см}$ ; —  $r = 2,02 \text{ см}$ ; —  $r = 2,36 \text{ см}$ ; —  $r = 2,54 \text{ см}$

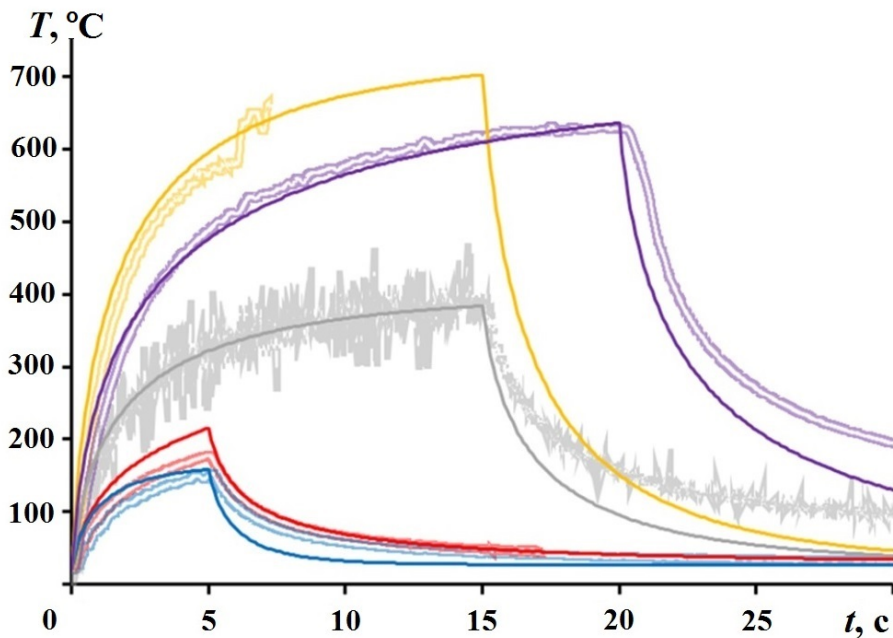


Рис. 6. Зависимости от времени максимальной температуры тыльной поверхности пластины при различной длительности воздействия ЛИ с радиусом пятна  $r_{эф} = 1,6$  см, с обдувом воздушным потоком и без него: —  $q = 150$  Вт/см<sup>2</sup>, без обдува,  $t = 5$  с; —  $q = 150$  Вт/см<sup>2</sup>, с обдувом,  $t = 5$  с; —  $q = 265$  Вт/см<sup>2</sup>, с обдувом,  $t = 15$  с; —  $q = 380$  Вт/см<sup>2</sup>, с обдувом,  $t = 20$  с; —  $q = 530$  Вт/см<sup>2</sup>, с обдувом,  $t = 15$  с

душным потоком и без него в модуле "Логос Тепло" необходимо определить зависимость от времени  $\theta(t)$  относительной погрешности максимальной температуры тыльной поверхности пластины. Относительная погрешность  $\theta(t)$  определялась по формуле

$$\theta(t) = \left| \frac{T_{расч}(t)}{T_{экс}(t)} - 1 \right|,$$

где  $T_{экс}(t)$  и  $T_{расч}(t)$  — максимальная температура тыльной поверхности пластины из алюминиевого сплава АМг-6 на момент времени  $t$ , полученная соответственно в экспериментах и расчетах.

На рис. 7–9 показаны графики зависимостей относительной погрешности максимальной температуры тыльной поверхности пластины от времени при различных режимах воздействия ЛИ.

Из анализа рис. 7–9 следует, что относительная погрешность максимальной температуры тыльной поверхности пластины в процессе воздействия ЛИ для большинства расчетных случаев не превышает 15%. Большие значения относительной погрешности в первую секунду могут быть объяснены инертностью термопары, что, в свою очередь, приводит к занижению измеренного значения температуры.

Относительная погрешность максимальной температуры тыльной поверхности пластины  $\theta(t) \approx 22\%$  для случая ЛИ со средней плотностью мощности  $q_{ср} = 150$  Вт/см<sup>2</sup> и длительностью  $t = 5$  с без аэродинамического обдува может быть объяснена плохим контактом термопары с тыльной поверхностью пластины.

Также для всех расчетных случаев наблюдается существенное увеличение относительной погрешности после окончания воздействия ЛИ: ее значение достигает  $\theta(t) \approx 45\%$  для расчетного случая с радиусом пятна ЛИ  $r_{эф} = 1,6$  см при среднем значении плотности мощности  $q_{ср} = 265$  Вт/см<sup>2</sup> в условиях обдува воздушным потоком.

Таким образом, можно сделать вывод, что в разработанной модели учтены не все эффекты процесса охлаждения пластины из алюминиевого сплава АМг-6 после ее нагрева непрерывным ЛИ.

### Заключение

В работе проведена валидация в программном модуле "Логос Тепло" модели нагрева пластины из алюминиевого сплава АМг-6 непрерывным ЛИ. Получено, что разработанная модель опи-



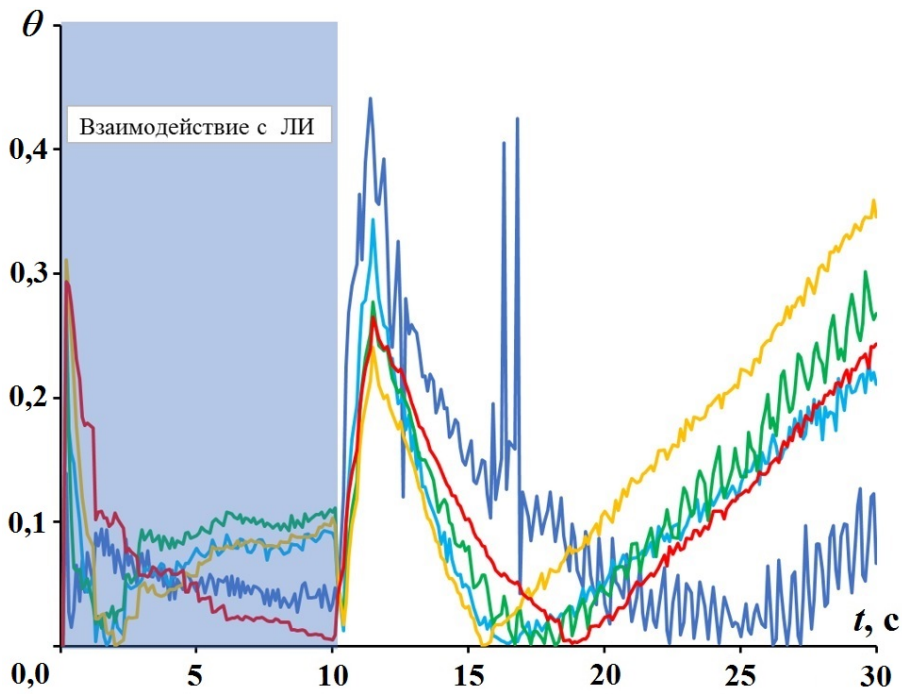


Рис. 7. Зависимости от времени относительной погрешности максимальной температуры тыльной поверхности пластины при длительности воздействия ЛИ 10 с со средней плотностью мощности в пятне  $q_{\text{ср}} = 190 \text{ Вт/см}^2$  и различных радиусах пятна без обдува воздушным потоком: —  $r = 1,02$  см; —  $r = 1,5$  см; —  $r = 2,1$  см; —  $r = 2,28$  см; —  $r = 2,87$  см

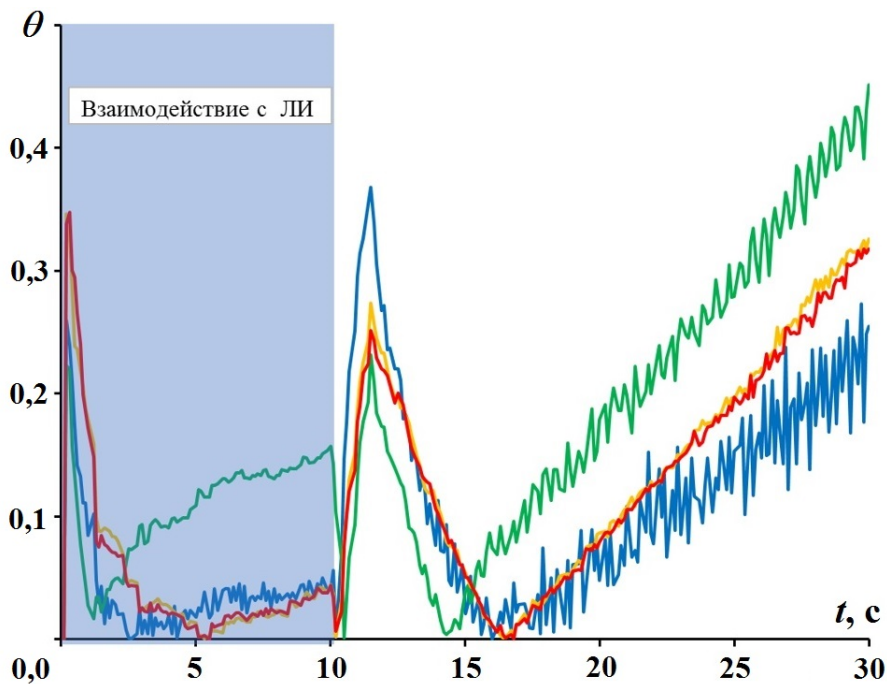


Рис. 8. Зависимости от времени относительной погрешности максимальной температуры тыльной поверхности пластины при длительности воздействия ЛИ 10 с со средней плотностью мощности в пятне  $q_{\text{ср}} = 190 \text{ Вт/см}^2$  и различных радиусах пятна без обдува воздушным потоком: —  $r = 1,22$  см; —  $r = 2,02$  см; —  $r = 2,36$  см; —  $r = 2,54$  см

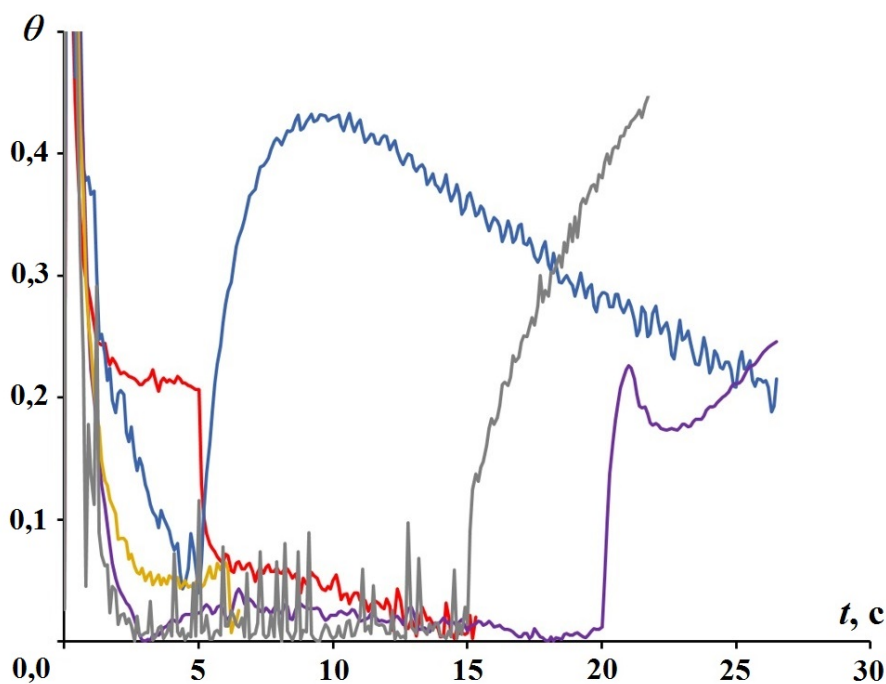


Рис. 9. Зависимости от времени относительной погрешности максимальной температуры тыльной поверхности пластины при радиусе пятна ЛИ  $r_{эф} = 1,6 \text{ см}$  с обдувом воздушным потоком и без него при различных значениях средней плотности мощности в пятне и длительности воздействия ЛИ: —  $q = 150 \text{ Вт/см}^2$ , без обдува,  $t = 5 \text{ с}$ ; —  $q = 150 \text{ Вт/см}^2$ , с обдувом,  $t = 5 \text{ с}$ ; —  $q = 265 \text{ Вт/см}^2$ , с обдувом,  $t = 15 \text{ с}$ ; —  $q = 380 \text{ Вт/см}^2$ , с обдувом,  $t = 20 \text{ с}$ ; —  $q = 530 \text{ Вт/см}^2$ , с обдувом,  $t = 15 \text{ с}$

сывает процесс нагрева пластины из алюминиевого сплава АМг-6 интенсивными неравномерными тепловыми потоками со значением максимальной относительной погрешности температуры не более 15 % как в условиях действия аэродинамического обдува, так и без него.

Однако результаты валидации модели в программном модуле "Логос Тепло" показывают, что данная модель не позволяет проводить математическое моделирование процесса охлаждения пластины из алюминиевого сплава АМг-6: в ней учтены не все эффекты процесса охлаждения, что, в свою очередь, приводит к занижению значения максимальной температуры тыльной поверхности пластины до 45 %.

Таким образом, разработанная модель позволяет моделировать процесс нагрева изделий из алюминиевого сплава АМг-6 интенсивными неравномерными тепловыми потоками с учетом обдува воздушным потоком и без него до температуры плавления.

Направлениями дальнейших исследований являются:

1) проведение теоретических исследований по поиску неучтенных эффектов;

- 2) доработка модели нагрева пластины из алюминиевого сплава АМг-6 непрерывным ЛИ с учетом обдува воздушным потоком и без него в модуле "Логос Тепло";
- 3) проведение повторных расчетных исследований по доработанной модели.

### Список литературы

1. Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования "Логос". <http://logos.vniief.ru>.  
Paket program inzhenernogo analiza i superkompyuternogo modelirovaniya "Logos". <http://logos.vniief.ru>.
2. Программный модуль "Логос Тепло". <http://logos.vniief/products/heat>.  
Programmnyy modul "Logos Teplo". <http://logos.vniief/products/heat>.
3. ГОСТ Р 57188-2016. Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2016.  
GOST R 57188-2016. Chislennoe modelirova-



- nie fizicheskikh protsessov. Terminy i opredeleniya. Moskva: Standartinform, 2016.
4. *Zapono A. E., Sakharov M. V., Tsibikov Z. S.* Study of processes of modified low-molecular polymer stirosil decomposition in the field of continuous intense laser radiation // J. Phys.: Conference Series. 2018. Vol. 946. Paper 012007.
  5. *Захаров Н. С., Запонов А. Э.* Тепловое действие лазерного излучения на конструкционные металлические сплавы // Двойные технологии. Секция "Инженерные проблемы стабильности и конверсии". 2017. № 1 (78). С. 8–12.  
*Zakharov N. S., Zaponov A. E.* Teplovoe deystvie lazernogo izlucheniya na konstruktsionnye metallicheskie splavy // Dvoynye tekhnologii. Sektsiya "Inzhenernye problemy stabilnosti i konversii". 2017. № 1 (78). S. 8–12.
  6. *Мансуров К. Р., Авдошин А. В., Авдошина О. Е., Кокшаров В. В., Мазанов В. А., Макейкин Е. Н., Маркин С. В., Мелёхин А. С.* Воздействие лазерного излучения на образцы из алюминиевого сплава АМг-6. Исследование влияния размера пятна и обдува // 11-я Всерос. школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям: Сб. докл. / Под общ. ред. С. Г. Гаранина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2018.  
*Mansurov K. R., Avdoshin A. V., Avdoshina O. E., Koksharov V. V., Mazanov V. A., Makeykin E. N., Markin S. V., Melyekhin A. S.* Vozdeystvie lazernogo izlucheniya na obraztsy iz aluminievogo splava AMg-6. Issledovanie vliyaniya razmera pyatna i obduva // 11-ya Vseros. shkola dlya studentov, aspirantov, molodykh uchyenykh i spetsialistov po lazernoy fizike i lazernym tekhnologiyam: Sb. dokl. / Pod obshsh. red. S. G. Garanina. Sarov: RFYaTs-VNIEEF, 2018.
  7. *Бабичев А. П., Бабушкина Н. А., Братковский А. М. и др.* Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.  
*Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovskiy A. M. i dr.* Fizicheskie velichiny: Spravochnik / Pod red. I. S. Grigoryeva, E. Z. Meylikhova. M.: Energoatomizdat, 1991.
- Статья поступила в редакцию 26.04.22.