

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 536.25, 551.551, 772.96

## Исследование конвективной турбулентности над нагретой поверхностью методом скоростной термографии

М.В. Агафонцев<sup>1,2</sup>, Л.О. Герасимова<sup>✉1</sup>, В.В. Рейно<sup>1</sup>, А.Н. Шестернин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 10.01.2023 г.;  
после доработки 3.04.2023 г.;  
принята к печати 12.05.2023 г.

Представлены результаты лабораторных экспериментов по определению характеристик конвективного потока, возникающего над нагретой металлической поверхностью, для различных высот и температур методом скоростной термографии. Характеристики определялись с помощью скоростной ИК-камеры путем съемки температурного поля малоинерционных бумажных мишеней, подвешенных над нагретой поверхностью, одновременно по всей вертикальной плоскости поля зрения ИК-камеры. По флуктуациям температурного поля поверхности мишеней были найдены коэффициент теплоотдачи, уровень интенсивности конвективного потока, полный поток и количество выделяемого тепла за время измерений на разных высотах над поверхностью. Построены энергетические спектры конвективной турбулентности в различных условиях. Анализ спектров турбулентности показал наличие инерционного интервала с наклоном, близким к степенному закону  $8/3$ , для всех рассмотренных высот над нагретой поверхностью, температур и условий турбулентности. Характеристиками конвективной турбулентности, полученными в работе, можно воспользоваться при тестировании различных оптических адаптивных систем управления лазерными пучками, при изучении распространения вихревых лазерных пучков и очагов горения, которые также характеризуются конвективной турбулентностью с дальнейшим переходом в атмосферную турбулентность, наведенную энергией горения.

*Ключевые слова:* турбулентность, конвекция, флуктуации температуры, скоростная термография, лабораторные эксперименты, энергетический спектр; turbulence, convection, temperature fluctuation, high-speed thermography, laboratory experiment, energy spectrum.

### Введение

Исследование характеристик конвективного потока над нагретой поверхностью является важным для изучения турбулентности в атмосфере и других средах. Часто возникает необходимость в проведении экспериментов в условиях конвективной турбулентности, например при тестировании работоспособности различных оптических адаптивных систем управления лазерным излучением или изучении распространения вихревых оптических пучков с разными топологическими зарядами. Любой очаг горения характеризуется конвективной колонкой, в которой зарождается конвективная турбулентность и постепенно развивается наведенная атмосферная

турбулентность. Поэтому так важны измерения турбулентных параметров и знание их поведения в контролируемых условиях.

В настоящей работе в качестве нагретой поверхности использовался модернизированный стол с подогревом размером  $200 \times 100$  см на стенде конвективной турбулентности (СКТ), который входит в состав оборудования ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН. На СКТ был выполнен ряд работ по приведению излучательной способности поверхности стола в соответствие со свойствами абсолютно черного тела (АЧТ). Задача была решена путем многократного нанесения на поверхность стола высокотемпературной матовой краски с последующей сушкой и спеканием слоев. Также были приведены в рабочее состояние все три канала нагревательных секций СКТ, общая мощность энергопотребления которых составляла более 10 кВт, с возможностью управления потреблением электроэнергии по каналам. Измерения температуры поверхности ИК-пирометрами после модернизации СКТ показали, что получено

\* Михаил Владимирович Агафонцев (kim75mva@gmail.com); Лилия Олеговна Герасимова (lilyan@iao.ru); Владимир Владимирович Рейно (reyno@iao.ru); Андрей Николаевич Шестернин (san@iao.ru).

равномерное покрытие поверхности стенда с излучательной способностью, близкой к  $0,93 \div 0,95$ . При максимальной температуре поверхности стола  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  перепад температур по всей поверхности составляет не более  $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Меняя высоту над столом, например в области прохождения лазерных пучков, и температуру на поверхности СКТ, задаются конкретные параметры или границы значений параметров конвективной турбулентности путем регистрации флуктуаций температуры и их последующей математической обработки.

Измерять характеристики конвективной турбулентности в пространстве над нагретым столом можно разными способами: например, перемещая в пространстве датчики проволочных анемометров или измерительную головку ультразвуковой метеостанции АМК-03. Пригоден и оптический метод, основанный на приеме сигналов с координатного датчика, измеряющего флуктуации смещения центра тяжести в сечении лазерного пучка [1, 2]. Авторами впервые для измерения характеристик конвективной турбулентности был использован ИК-метод скоростной термографии [3]. Метод обладает неоспоримыми преимуществами: он бесконтактный, имеет высокую чувствительность к перепадам температур и вносит минимальные возмущения в структуру теплового потока.

Целью данных исследований является определение характеристик конвективной турбулентности над нагретой поверхностью для разных высот и температур в условиях ограниченных объемов.

В настоящей работе применен бесконтактный метод скоростной ИК-термографии для съемки температурного поля малоинерционных бумажных мишеней, подвешенных над нагретой поверхностью, одновременно по всей вертикальной плоскости поля зрения ИК-камеры. По флуктуациям температуры

в различных турбулентных условиях построены энергетические спектры конвективной турбулентности.

## Схема эксперимента

Схема измерений на СКТ представлена на рис. 1. Над нагреваемой рабочей поверхностью в центральной области стола на высоте  $121\text{ см}$  подвешивались три плети, подгруженные грузиками, на равном расстоянии  $20\text{ см}$  друг от друга. Каждая плеть представляла собой связку из  $10$  мишеней, расположенных с шагом  $12\text{ см}$ . В качестве мишеней использовались квадратики из тонкой ( $0,009\text{ см}$ ) писчей бумаги размером  $2 \times 2\text{ см}$  и весом  $22\text{ мг}$ . Плеть слева отличалась от остальных тем, что с обратной стороны каждая мишень на ней была обклеена алюминиевой фольгой, ее вес составлял  $45\text{ мг}$ . В ходе эксперимента была проведена оценка нагрева мишеней тепловым потоком с контролируемыми параметрами. Установлено, что при температуре  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  и скорости теплового потока  $1,2\text{ м/с}$  средняя постоянная времени нагрева  $\langle \tau_{\text{ин}} \rangle = 0,63\text{ с}$ , удельная теплоемкость мишени  $c_p = 230\text{ Дж/(кг} \cdot \text{ }^{\circ}\text{C)}$ .

Регистрация на поверхности мишеней температурных флуктуаций, образующихся в результате воздействия восходящих тепловых потоков, осуществлялась скоростной ИК-камерой JADE-J530SB. Поле ее зрения на рис. 1 показано пунктирным квадратом. Геометрия эксперимента позволила снимать в два приема, сначала пять нижних мишеней, затем пять верхних.

ИК-камера относится к типу научно-исследовательских камер, которые оснащаются набором объективов и спектральных фильтров, калибрующихся по шкале температур до  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  и более, а также имеют шкалу в единицах энергетической яркости.

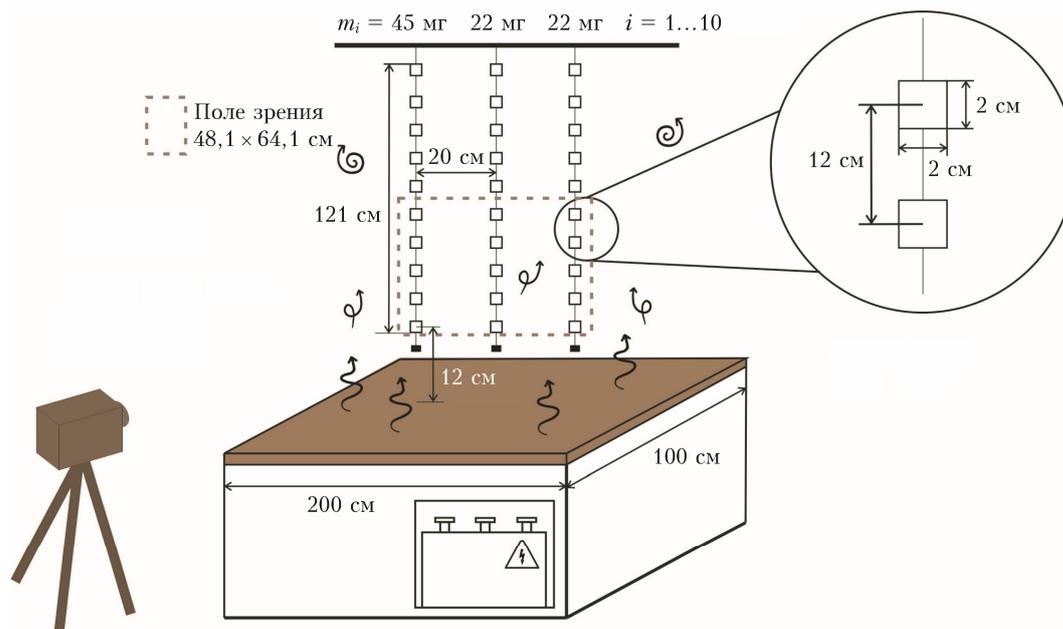


Рис. 1. Схема измерений характеристик конвективной турбулентности методом скоростной термографии

Рабочий диапазон камеры –  $2,5 \div 5,1$  мкм ИК-длин волн в режиме «open», т.е. без ослабляющих фильтров и на максимальной чувствительности с разрешением по температуре  $0,03$  К.

Каждая последовательность термограмм регистрировалась в течение  $300$  с с частотой  $30$  кадров в секунду в режиме «Multi», в котором каждый специализированный кадр формируется из трех кадров, снятых с частотой  $90$  к/с. Этот режим используется для расширения рабочего температурного диапазона в дорогостоящих ИК-камерах научно-исследовательского класса и достигается путем сшивки разных по чувствительности диапазонов измерения температур в кадрах. Применяемая в работе сшивка состоит из диапазона  $-15 \div 40$  °С, затем  $40 \div 100$  °С и  $100 \div 200$  °С, т.е. получается расширенный диапазон измерения температур от  $-15$  до  $200$  °С.

Время ИК-съемки выбиралось исходя из экспериментальных условий и соображений трудоемкости обработки количества записанных файлов. Пространственное разрешение в этом эксперименте определялось размером мишеней, геометрией эксперимента и оптикой камеры. При формате матрицы ( $320 \times 240$  пикселей), объектива  $50$  мм и выбранной геометрии эксперимента пространственное разрешение составило  $2$  мм на пиксель, поле зрения ИК-камеры  $481 \times 641$  мм, а время регистрации ( $1$  пиксель/ $160$  мкс) определяется временем экспозиции, которая, в свою очередь, определяется заданным температурным диапазоном.

Все измерения пульсаций температур проводились в пять этапов: при комнатной температуре  $23$  °С, затем после нагрева в течение  $20$  мин до  $44$  °С (напряжение трехфазной сети  $U = 50$  В), далее до  $88$  °С ( $100$  В), до  $144$  °С ( $150$  В) и окончательно до  $198$  °С ( $200$  В). Всего было зарегистрировано  $10$  реализаций по  $9000$  кадров каждая.

### Определение характеристик конвективного потока

Теплопроводность тесно связана с понятием температурного поля и градиента температур. Поэтому к характеристикам, которые могут быть определены бесконтактным методом, относятся: температурное поле по всей поверхности в разный момент времени и коэффициент теплоотдачи  $\alpha = \alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{т}} + \alpha_{\text{л}}$ , где  $\alpha_{\text{конв}}$  – коэффициент теплоотдачи за счет конвекции;  $\alpha_{\text{т}}$  – за счет теплопроводности;  $\alpha_{\text{л}}$  – передача тепла в виде ИК-волн ( $\text{л}$  – лучистая энергия).

Мгновенные значения температуры теплового потока над нагретой горизонтальной поверхностью были измерены методом скоростной термографии по малоразмерным мишеням, подвешенным над нагретой поверхностью (см. рис. 1).

Для анализа результатов измерений на термограмме в области мишеней (рис. 2) на каждой из них выбирались  $9$  точек по одному пикселю (размером  $2$  мм) с фиксированным расстоянием. Время съемки температурных значений в одном пикселе составляло  $160$  мкс для всей матрицы одновременно.

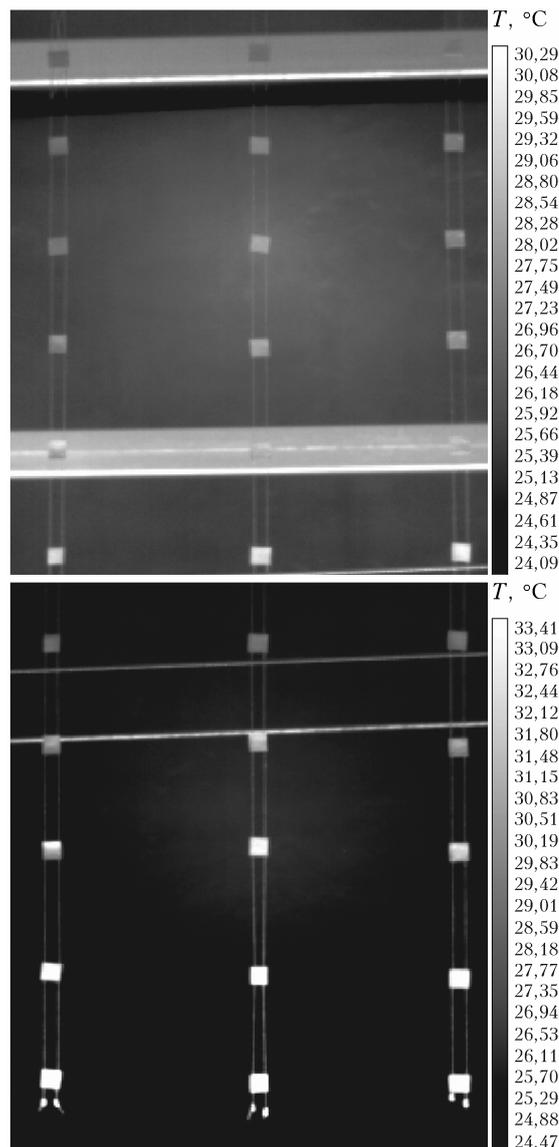


Рис. 2. Сдвоенная по высоте термограмма мишеней при нагреве поверхности стола до  $88$  °С, напряжении  $U = 100$  В и потреблении тепла  $Q = 2,3$  кВт

На рис. 3 представлены распределения средней температуры в вертикальном сечении, усредненной за  $300$  с по  $9$  точкам для всех  $9000$  кадров.

Видно, что усредненная за  $300$  с температура на высоте  $12$  см над поверхностью стола достигала  $90$  °С при температуре его поверхности  $T_{\text{пов}} = 198$  °С (градиент температур  $\text{grad}T$  достигал  $9$  °С/см) и понижалась до  $35$  °С на высоте  $120$  см ( $\text{grad}T = 1,35$  °С/см). Из анализа температурных кривых сделаны следующие выводы: для всех мишеней левой плети наблюдаются выбросы температуры на высоте  $70$  см в районе шестой мишени (возможно, это обусловлено конструкцией стола, переключкой в поле зрения или спецификой самой конвекции), в остальных режимах нагрева стола и на других высотах для всех кривых наблюдается плавное уменьшение температуры с высотой. Из анализа термограмм (рис. 2) и графиков (рис. 3) видно,

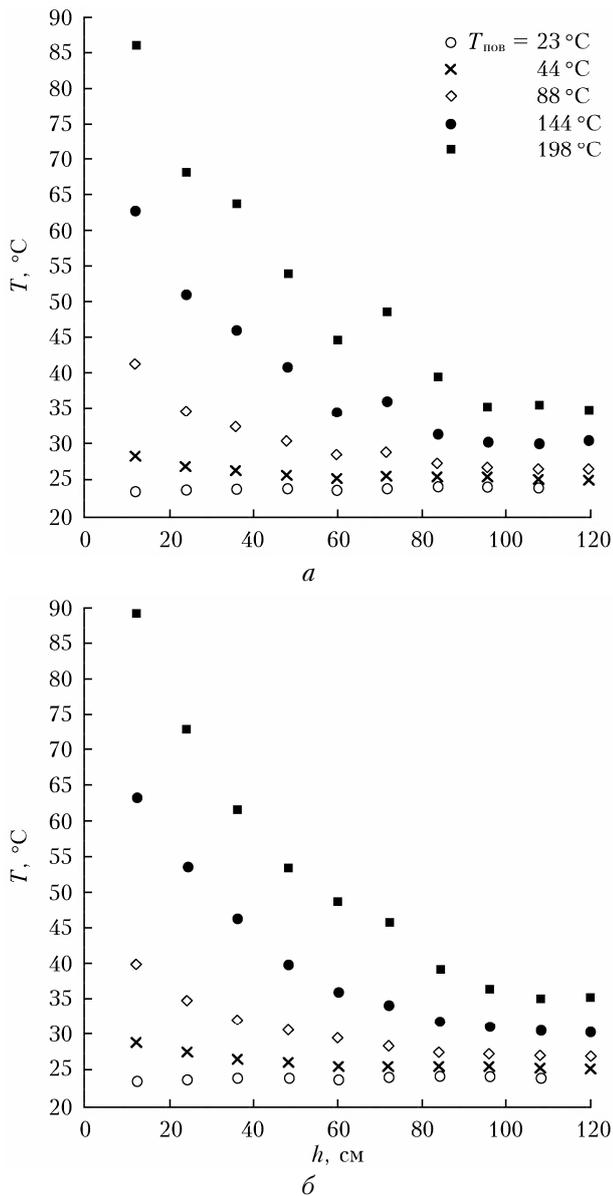


Рис. 3. Усредненная за 300 с температурная стратификация по данным: с левой мишени, обклеенной алюминиевой фольгой с обратной стороны (а); с бумажной мишени, расположенной справа (б); на рисунке отображены четыре режима нагрева стола,  $T_{\text{пов}} = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$  – без нагрева

что следует ограничить рост температуры поверхности стола до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  и производить ИК-съемку на уровне второй мишени и выше, т.е.  $h \geq 24\text{ см}$ , так как на высоте первой мишени ( $h = 12\text{ см}$ ) наблюдается искривление плавных температурных кривых. Отклонение температуры с высотой для армированных алюминия мишеней требует дальнейшего анализа.

Мощность теплового процесса на СКТ характеризуется количеством передаваемой теплоты в единицу времени через единичную площадь  $S$ :

$$\Phi = Qt = \alpha S(T_{\text{пов}} - T_h)t, \quad (1)$$

так называемым тепловым потоком  $Q = \alpha S(T_{\text{пов}} - T_h)$  Вт. На поверхности полный поток рассчитывался как произведение

$$Q = IU = (I_1 + I_2 + I_3)U, \quad (2)$$

где  $I$  – суммарный ток потребления в трех нагревательных элементах. Для расчета полного потока тепла  $Q$  на некоторой высоте  $h$  над столом необходимо было вычислить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ), что является сложной задачей, так как  $\alpha$  зависит от многих факторов, таких как геометрия и состояние поверхности, скорость и физические параметры среды (вязкость, плотность, удельная теплоемкость, температурный коэффициент объемного расширения). В нашем случае для вычисления  $\alpha$  были использованы пять критериев теории подобия в виде безразмерных величин, составленных из размерных физических параметров, свойственных данному виду теплоотдачи [4–7].

1. Критерий Грасгофа ( $Gr$ ) – характеризует подъемные силы вследствие разности плотности среды при естественной конвекции (интенсивность свободно-конвективного движения):

$$Gr_{l_0} = \frac{g\beta(T_{\text{пов}} - T_h)l_0^3}{\nu^2}, \quad (3)$$

где  $g = 9,81$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $\beta = 1/(273 + T_h)$  – коэффициент объемного расширения теплоносителя,  $\text{K}^{-1}$ ;  $\Delta T = T_{\text{пов}} - T_h$  – наложенный перепад температур между поверхностью и на высоте  $h$ ;  $l_0$  – характерный масштаб поверхности теплообмена,  $\text{м}$ ;  $\nu$  – кинематическая вязкость газа,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

2. Прандтля ( $Pr$ ) – показывает влияние изменчивости физических свойств среды на теплоотдачу:

$$Pr = \nu/a, \quad (4)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ; в условиях проводимого эксперимента является табличным значением.

3. Релея ( $Ra$ ) – мера нестабильности слоя газа из-за разницы температуры и плотности сверху и внизу. Вычисляется путем перемножения критериев Прандтля и Грасгофа:

$$Ra = Gr \cdot Pr. \quad (5)$$

4. Рейнольдса ( $Re$ ) – характеризует отношение сил инерции к силам внутреннего трения среды:

$$Re = \omega l_0/\nu, \quad (6)$$

где  $\omega$  – характерный масштаб скорости воздушного потока,  $\text{м}/\text{с}$ .

В зависимости от  $Re$  выбиралось уравнение для определения критерия Нуссельта  $Nu$ .

5. Нуссельта ( $Nu$ ) – характеризует вклад конвективного потока в полный поток теплоты. Для естественной конвекции теплоотдача вычисляется путем решения уравнения вида

$$Nu = C(Ra)^n \varepsilon_T = C(Gr \cdot Pr)^n \varepsilon_T = \alpha_{\text{конв}} \frac{\lambda}{l_0}, \quad (7)$$

где  $C$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от величины  $Ra$  (табл. 1);  $\varepsilon_T = (Pr_h/Pr_{пов})^{0,25}$  – поправка на изменение физических свойств среды в зависимости от температуры;  $\lambda$  – теплопроводность вещества, Вт/(К·м);  $\alpha_{конв}$  – коэффициент теплоотдачи за счет конвекции, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Таблица 1  
Коэффициенты  $C$  и  $n$  для разных значений  $Ra$  [4, 7]

Коэффициент	Ra		
	$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	$> 2 \cdot 10^7$
$C$	1,180	0,54	0,135
$n$	0,125	0,25	0,330

После решения правой части уравнения (7) был рассчитан  $\alpha_{конв}$ . Тепловой поток за счет теплопроводности определяется на основании закона Фурье

$$\alpha_m = -\lambda/\delta_{пов}, \quad (8)$$

где  $\delta_{пов}$  – толщина поверхности.

Коэффициент теплоотдачи лучистой энергии  $\alpha_l$  определялся по закону Стефана–Больцмана:

$$\alpha_l = \frac{\varepsilon_{пов} c_0 \left[ \left( \frac{T_{пов} + 273,15}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{окр} + 273,15}{100} \right)^4 \right]}{T_{пов} - T_h}, \quad (9)$$

где  $c_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\varepsilon_{пов} = 0,95$  – степень черноты поверхности;  $T_{окр}$  – температура окружающей среды.

На рис. 4 представлены зависимости критериев  $Nu$  от  $Ra$  для различной  $T_{пов}$ . В качестве определяющей температуры взята средняя температура  $T_0 = \langle (T_{пов} + T_h)/2 \rangle_{t=300\text{ с}}$ , которая зависит от заданной  $T_{пов}$  и меняется с высотой,  $l_0 = S/P$ , где  $S$  и  $P$  – площадь и периметр стола.

Видно, что даже при отсутствии нагрева на стенде наблюдалась слабая конвекция, которая усиливалась с высотой  $h$ . При  $44 \leq T_{пов} < 198$  °С резко увеличивались значения  $Nu$ , а точнее, росла интенсивность конвективной турбулентности. При нагреве стола до 198 °С ( $U = 200$  В) дальнейший рост интенсивности не наблюдался, критерий  $Nu$  выходил на насыщение.

На рис. 5 приведены расчеты полного потока тепла  $Q$  и количество передаваемого тепла в единицу времени (см. табл. 2) на высотах от 12 до 120 см над столом. Видно, что при полном потреблении энергии по трем фазам ( $h = 0$ ) количество выделяемого тепла в течении 300 с уменьшалось и на высоте 120 см принимало значения, приведенные в табл. 2.

Таблица 2  
Количество тепла  $\Phi$ , МДж, выделяемого за 300 с

$h$ , м	$T_{пов}$ , °С			
	44	88	144	198
0	0,20	0,07	1,49	2,7
1,2	0,08	0,09	0,70	1,4

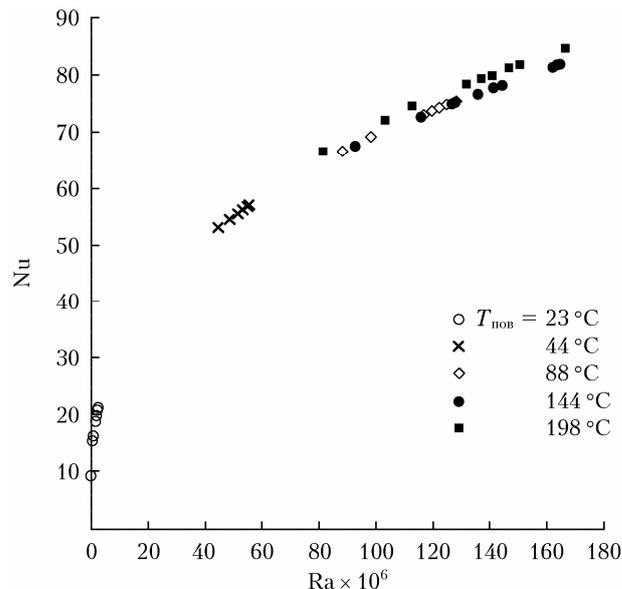


Рис. 4. Зависимости критерия  $Nu$  от критерия  $Ra$

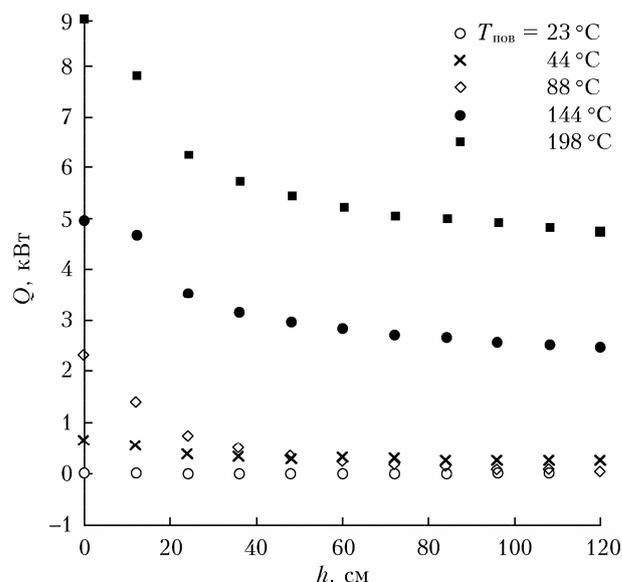


Рис. 5. Стратификация полного теплового потока

Результаты расчета критерия Рейнольдса  $Re$  для нашего эксперимента на заданной высоте  $12 \leq h \leq 120$  см представлены на рис. 6. В расчетах характерный масштаб скорости воздушного потока задавался от 1–3 м/с, температура  $T_0 = \langle T_h \rangle_{t=300\text{ с}}$  и  $l_0 = h$ . Скорость воздушного потока измерялась термоанемометром фирмы Kurz TM instruments Inc., который измеряет скорость потока в диапазоне  $w = 0 \div 30$  м/с, погрешность измерения составляет  $\pm 0,2$  м/с при температуре потока  $0 \div 250$  °С ( $\pm 2,5$  °С).

Из рис. 6 следует, что значения  $Re$  увеличиваются с высотой. В случае  $T_{пов} = 144$  °С наблюдалось снижение уровня турбулентности, при  $T_{пов} = 198$  °С движение в слое нагретого воздуха прекращалось.

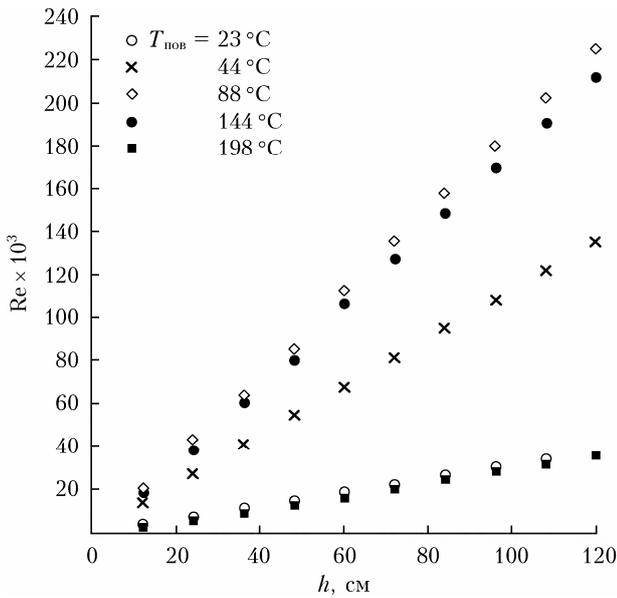


Рис. 6. Изменение критерия Re с высотой

На рис. 7 приведены примеры энергетических спектров конвективной турбулентности при  $T_{\text{пов}} = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 7, а, б) и  $88\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 7, в, г) в логарифмическом масштабе. При вычислении спектров турбулентности [8]:

$$S(f) = \frac{\Delta t}{n} (\text{Re}^2[S(f_n)] + \text{Im}^2[S(f_n)]) \quad (10)$$

использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье от распределения температуры во временной области  $T(t_i)$  за время  $t = N\Delta t$ , взятой в одной центральной точке мишени на разных высотах:

$$S(f_n) = \sum_{i=0}^{N-1} T(t_i) \exp\left\{-j2\pi \frac{t_i}{N}\right\}, \quad (11)$$

где  $n$  – количество отсчетов;  $j$  – мнимая единица.

Анализ спектров турбулентности показал наличие инерционного интервала в диапазоне  $f \in (0,04; 0,2)$  Гц для всех рассмотренных температур нагрева и высот над поверхностью. В указанном диапазоне частот участок кривой, построенной в логарифмическом масштабе, можно аппроксимировать прямолинейным отрезком, соответствующим степенному закону  $S(f) \sim f^{-8/3}$ . Подобные области когерентной (неколмогоровской) турбулентности в закрытых помещениях получены в экспериментах, выполненных с использованием ультразвуковой

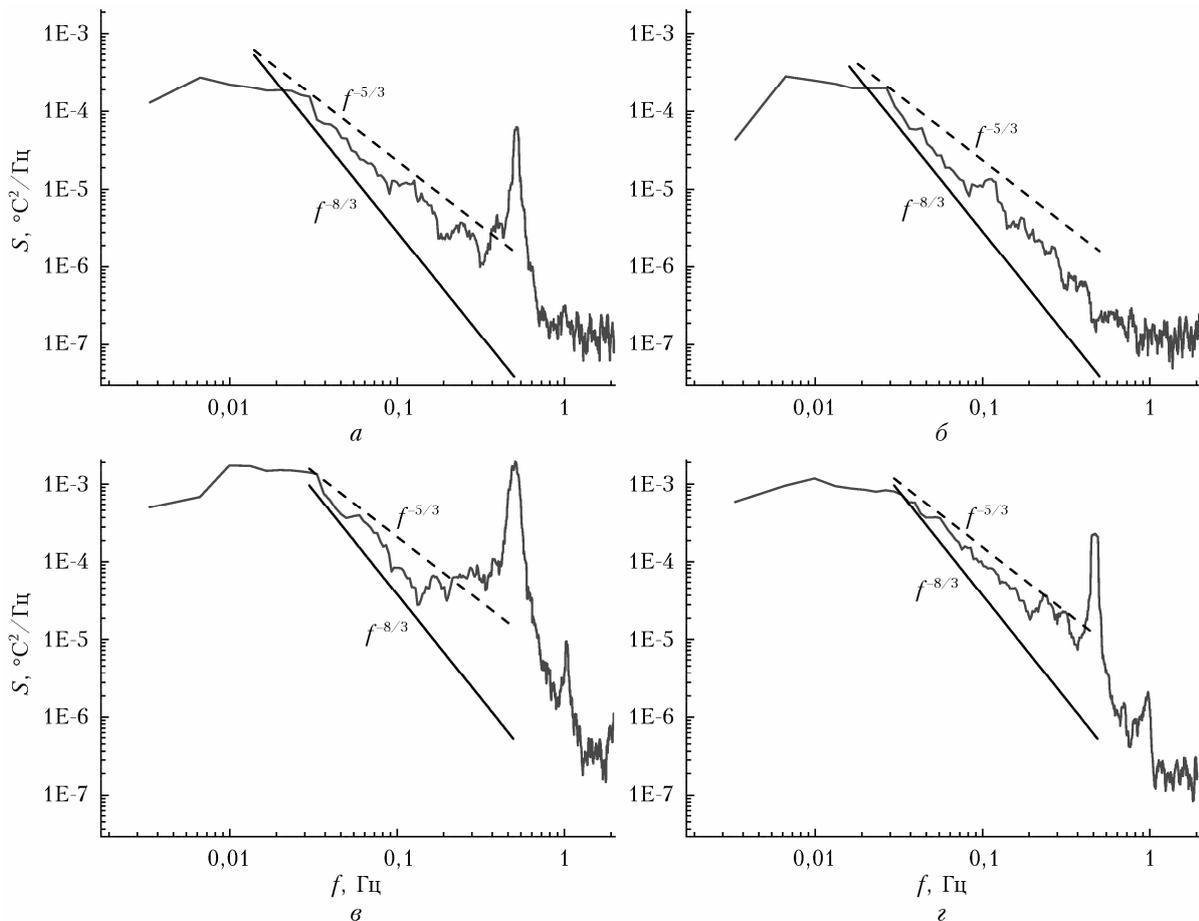


Рис. 7. Временные частотные спектры конвективной турбулентности на высотах  $h = 24$  (а, в);  $72$  см (б, г) при  $T_{\text{пов}} = 44$  (а, б) и  $88\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в, г)

метеостанции [9, 10]. С увеличением  $T_{\text{пов}}$  (рис. 7, *з*) или с уменьшением высоты над поверхностью (рис. 7, *а, в*) появляются пики в области  $f = 0,5$  Гц.

## Заключение

В работе представлены результаты лабораторных экспериментов по определению характеристик конвективной турбулентности с использованием ИК-съемки температурного поля при различной температуре нагрева стенда конвективной турбулентности. Характеристики турбулентности определялись по флуктуациям температуры теплового потока над нагретой горизонтальной поверхностью, измеренным бесконтактным методом скоростной термографии поля температур малоинерционных мишеней.

Определены распределения температурного поля и коэффициенты теплоотдачи на разных высотах над поверхностью СКТ и в разное время. При нагреве до  $T_{\text{пов}} \leq 198$  °С вертикальный градиент температуры на высоте  $12 \leq h \leq 120$  см изменялся в пределах  $9 \leq \text{grad}T \leq 1,35$  °С/см.

Построены энергетические спектры конвективной турбулентности по данным флуктуаций температуры в различных турбулентных условиях. Анализ спектров турбулентности показал наличие инерционного интервала  $f \in (0,04; 0,2)$  Гц с наклоном, близким к степенному закону  $8/3$  для всех рассмотренных условий турбулентности и высот над поверхностью. Появление и рост пиков в области 0,5 Гц с увеличением температуры нагрева — это устраняемый эффект, вызванный устройством подвеса мишеней, так как свободно подвешенные с подгрузкой мишени под воздействием конвективных потоков начинают раскачиваться подобно маятникам.

Результаты наших исследований показывают, что для измерений характеристик конвективной турбулентности можно использовать ИК-метод скоростной термографии наряду с оптическими, акустическими и другими способами. Метод ИК-термографии обладает рядом преимуществ в сравнении с последними, а именно бесконтактностью, быстродействием, высокой чувствительностью к перепадам темпе-

ратур и минимальными возмущениями, вносимыми в структуру теплового потока.

**Финансирование.** Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Атмосфера» в рамках государственного задания Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН.

## Список литературы

1. *Емалеев О.Н., Лукин В.П., Покасов В.В., Сазанович В.М., Хмелевцов С.С.* Оптические измерения спектров пульсаций показателя преломления в модельной конвекции // Изв. вузов. Физ. 1976. № 9. С. 100–105.
2. *Лукин В.П., Сазанович В.М.* Исследование турбулентных характеристик в условиях конвекции // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1978. Т. 14, № 11. С. 1212–1215.
3. *Жилкин Б.П., Ларионов И.Д., Щуба А.Н.* Применение тепловизора для определения температурных полей газовых потоков // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 4. С. 136–137.
4. *Ярышев Н.А.* Теоретические основы измерения нестационарной температуры. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. 256 с.
5. *Конвективный теплообмен в однородной среде (теплоотдача): учеб. пособие / под ред. В.В. Сахина.* СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2013. 224 с.
6. *Мухеев М.А., Мухеева И.М.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереот. М.: Энергия, 1977. 344 с.
7. *Дульнев Г.Н.* Теория тепло- и массообмена. СПб.: НИУ ИТМО, 2012. 195 с.
8. *Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шметтер С.М., Шур Г.Н.* Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 287 с.
9. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Формирование турбулентности в астрономических обсерваториях юга Сибири и Северного Кавказа // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 3. С. 228–246; *Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V.* Formation of turbulence at astronomical observatories in Southern Siberia and North Caucasus // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 4. P. 464–482.
10. *Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торгаев А.В.* Структура турбулентных движений воздуха в шахте главного зеркала Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН. Эксперимент и численное моделирование // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 905–910. DOI: 10.15372/AOO20161102.

### *M.V. Agafontsev, L.O. Gerasimova, V.V. Reino, A.N. Shesternin. Investigation of convective turbulence characteristics over a heated surface by high-speed thermography.*

The results are presented of laboratory experiments to determine the characteristics of convective turbulence over a heated metal surface for various heights and temperatures by high-speed thermography. The study of convective turbulence characteristics was carried out using a high-speed infrared camera by shooting the temperature field of low-inertia paper targets suspended above the heated surface simultaneously over the entire vertical plane of the IR camera field of view. Based on fluctuations in the temperature field of the target surface, the heat transfer coefficient, the intensity level of the convective flow, the total flow, and the amount of heat generated during measurements at different heights above the surface are determined. The energy spectra of convective turbulence are plotted under various turbulent conditions. An analysis of the turbulence spectra showed the presence of an inertial interval with a slope close to the  $8/3$  power law for all considered heights above the heated surface, temperatures, and turbulence conditions. Characteristics of convective turbulence obtained can be used when testing various optical adaptive laser beam control systems, studying the propagation of vortex laser beams and combustion centers, which are also characterized by convective turbulence with a further transition to atmospheric turbulence induced by combustion energy.