

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕПЛОВАЯ ГРАДУИРОВОЧНАЯ УСТАНОВКА

© 2019 г. Ю. В. Жилин^а, Ю. А. Салимьянова^{а, *}, А. А. Шамшурин^б

^а Московский государственный технический университет им. Н.А. Баумана
Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1

^б Центральный аэродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
Россия, 140180, Жуковский Московской обл., ул. Жуковского, 1

*e-mail: JuliaSalim@mail.ru

Поступила в редакцию 12.05.2017 г.

После доработки 29.01.2018 г.

Принята к публикации 03.06.2018 г.

Импульсная тепловая градуировочная установка предназначена для градуировки датчиков нестационарного теплового потока, установленных на моделях для исследования теплообмена в аэродинамических трубах. Глубокая модернизация установки существенно расширила диапазон ее рабочих параметров: плотность теплового потока — от 0.01 до 50 Вт/см², температуру потока — до 550°C. Стала проще эксплуатация установки, сняты ограничения на размеры градуируемых моделей. В статье приведены также экспериментальные результаты, полученные при измерениях на установке с гибким электрическим нагревателем.

DOI: 10.1134/S0032816218060319

1. ВВЕДЕНИЕ

Импульсная тепловая градуировочная установка (и.т.г.у.) была разработана в отделении № 8 ЦАГИ Ю.Ю. Колочинским [1]. Установка предназначена в основном для градуировки применяемых при изучении теплообмена в аэродинамических трубах датчиков нестационарных конвективных тепловых потоков. Она также используется для экспресс-оценок теплофизических свойств материалов, из которых изготавливают модели аппаратов, для исследований теплообмена, определения инерционности датчиков температуры торможения газовых потоков и других задач, связанных с тепловыми измерениями.

В ходе длительной эксплуатации установка постоянно модернизировалась с целью повышения точности измерений и удобства работы. Однако на определенном этапе понадобилась коренная реконструкция установки в целом. Появление экспериментальных моделей гиперзвуковых летательных аппаратов размером 500 мм потребовало разработки действующего макета принципиально нового светолучевого нагревателя для градуировки установленных на летательных аппаратах датчиков теплового потока. Это позволило существенно расширить диапазон рабочих параметров установки, снизить инерционность измерений, упростить процедуру градуировки. Однако, наряду с этим, при светолучевом нагреве возникли и

некоторые методические сложности, связанные, прежде всего, с неконтролируемым разбросом значений коэффициентов поглощения излучения для различных датчиков, что было несущественно при конвективном нагреве. Выявились также непостоянство граничных условий при лучевом нагреве и их зависимость от времени проведения эксперимента.

Поэтому одновременно со светолучевым нагревателем был разработан гибкий электрический нагреватель. Применение обоих нагревателей — гибкого и светолучевого — позволило проводить градуировку крупногабаритных моделей и малоинерционных датчиков теплового потока.

2. ОПИСАНИЕ И.Т.Г.У.

Принцип действия установки состоит в создании на градуируемом датчике ступенчатого, известного по величине импульса конвективного теплового потока и регистрации ответного сигнала датчика температуры (рис. 1). Начальная температура градуируемого датчика близка к комнатной.

Конвективный тепловой поток создается струей горячего воздуха, истекающего из сужающегося сопла электрического нагревателя. Воздушная струя направлена перпендикулярно датчику, диаметр струи должен быть не менее диаметра его ак-

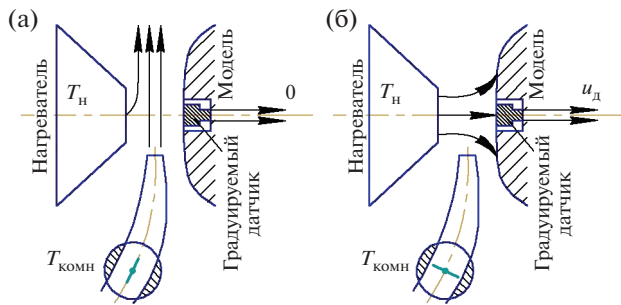


Рис. 1. Принцип действия и.т.г.у.: **а** — до подачи теплового импульса; **б** — после его подачи. T_H — температура воздуха на выходе из сопла нагревателя, $T_{комн}$ — температура потока холодного воздуха; u_d — сигнал датчика.

тивной поверхности. Для обеспечения ступенчатого воздействия на датчик струя горячего воздуха до подачи теплового импульса отклоняется в сторону струей холодного воздуха, который истекает из щелевого сопла (см. рис. 1а). При этом температура градуируемого датчика примерно равна комнатной температуре. Для подачи теплового импульса отклоняющую струю на некоторое время прерывают с помощью быстродействующего “отсечного клапана”, в результате чего струя нагретого воздуха будет направлена непосредственно на датчик (см. рис. 1б). На градуируемый датчик подают ступенчатый по форме и известный по величине импульс конвективного теплового потока. Если установлен датчик калориметрического типа, то по известной величине теплового потока q_d и измеренному приращению

температуры ΔT_d датчика за время $\Delta \tau$ можно рассчитать его индивидуальный градуировочный коэффициент:

$$K_d = \frac{q_d}{\Delta T_d / \Delta \tau}. \quad (1)$$

Схема установки показана на рис. 2. Сжатый до 4–6 атм воздух из компрессора K через охладитель $Охл1$, снижающий температуру сжатого воздуха после компрессора до комнатной, и редуктор $Ред$, который поддерживает давление на входе в критическое сопло $КС$ на уровне 1.25 атм, попадает в электрический нагреватель $Нагр$. Критическое сопло позволяет поддерживать постоянным расход воздуха через нагреватель. Мощность нагревателя регулируется автотрансформатором $Рег$. Нагретый воздух истекает из конических сопел C_1 и C_2 и попадает на датчик режима $ДР$ и градуируемый датчик $Д$. Датчик режима охлаждается водой из системы $Охл2$, которая включает в себя вентилятор $В$, блок питания $БП$ и насос $Н$. Показания градуируемого датчика, пропорциональные проходящему через него стационарному тепловому потоку, ставятся в соответствие с сигналами датчика режима u_p . Подача горячего воздуха на градуируемый датчик регулируется специальным отсечным клапаном $ОК$ и пневмокнопкой $ПК$. Сигналы с обоих датчиков проходят через усилители Y_1 и Y_2 и регистрируются измерительно-вычислительным комплексом $ИВК$.

Отсечной клапан (см. рис. 2) изготовлен в форме цилиндра с щелевым соплом на выходе. Внутри цилиндра свободно перемещается поршень, приводимый в движение сжатым воздухом. Нормальное положение клапана — открытое. При

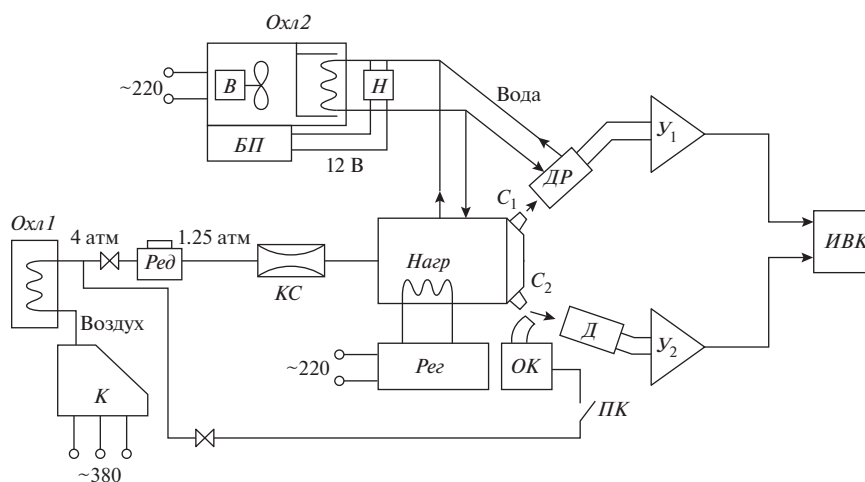


Рис. 2. Схема и.т.г.у. K — компрессор; $Охл1$ — охладитель; $Ред$ — редуктор; $КС$ — критическое сопло; $Нагр$ — электрический нагреватель; $Рег$ — автотрансформатор; C_1 и C_2 — конические сопла; $ДР$ — датчик режима; $Д$ — градуируемый датчик; $Охл2$ — система охлаждения; $В$ — вентилятор; $БП$ — блок питания; $Н$ — насос; $ОК$ — отсечной клапан; $ПК$ — пневмокнопка; Y_1 и Y_2 — усилители; $ИВК$ — измерительно-вычислительный комплекс.

этом пневмокнопка *ПК* отключена, и струя воздуха из щелевого сопла создает “холодную завесу” на градуируемом датчике (см. рис. 1а). При нажатии *ПК* поршень приходит в движение и резко перекрывает подачу воздуха в щелевое сопло (см. рис. 1б). Время перекрытия струи составляет около 1 мс, что подтверждено многократными проверками с помощью малоинерционных тонкопленочных датчиков теплового потока [2].

3. МОДЕРНИЗАЦИЯ И.Т.Г.У.

В цели модернизации входило:

- а) расширение диапазона рабочих температур и тепловых потоков;
- б) увеличение размеров градуируемых моделей;
- в) увеличение допустимых размеров градуируемых датчиков путем увеличения диаметров сопел и, следовательно, размеров пятна нагрева.

В процессе эксплуатации установку несколько раз модернизировали. Исходная аналоговая система измерений на базе светолучевого осциллографа была заменена на систему сбора на персональном компьютере. Обновлена и усилительная аппаратура: в настоящее время здесь используются серийные усилители Ф8024-25 с частотным диапазоном до 1 кГц и фиксированными коэффициентами усиления K , равными: 500, 1000, 5000, 10000.

В дальнейшем из схемы установки была исключена система водяного охлаждения (*Охл2* на рис. 2), которую использовали для защиты градуируемых датчиков от дополнительного лучевого нагрева со стороны торца нагревателя и для охлаждения датчика режима. Лучевой нагрев удалось свести к минимуму, улучшив теплоизоляцию торца нагревателя с помощью многослойной изоляции из алюминиевой и нержавеющей фольги.

Конвективный тепловой поток в градуируемый датчик определяется известным уравнением конвекции:

$$q_d = \alpha(T_n - T_{\text{комн}}), \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи на чувствительной поверхности датчика.

Поскольку в рабочем диапазоне параметров и.т.г.у. коэффициент теплоотдачи меняется незначительно, а его величина связана с температурой нагретого воздуха T_n , можно утверждать, что тепловой поток q_d является однозначной функцией этой температуры, а значит, и сигнала датчика режима:

$$q_d = f_1(T_n - T_{\text{комн}}) = f_2(u_p), \quad (3)$$

где u_p — показания датчика режима (термопары на выходе из сопла).

В связи с этим водоохлаждаемый датчик режима был заменен на тонкую ленточную термопару

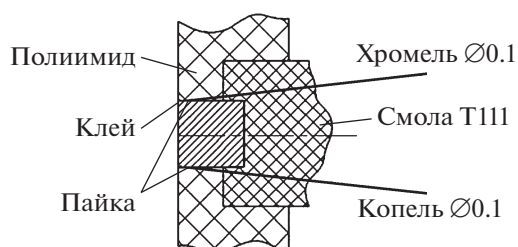


Рис. 3. Схема контрольного датчика теплового потока.

“хромель—копель” толщиной 0.03 мм и шириной 0.4 мм, растянутую на traversах диаметром 1 мм, выполненных из тех же сплавов. Размеры спая термопары $0.4 \times 0.4 \times 0.03$ мм.

Данная замена не только упростила конструкцию и.т.г.у., но и повысила чувствительность при определении режима работы установки, особенно для малых тепловых потоков (от 1 до 0.01 Вт/см²).

Предварительная градуировка и.т.г.у. заключалась в определении вида эмпирической зависимости (3). Для определения и уточнения абсолютных величин конвективного теплового потока, воздействующего на градуируемый датчик, необходима периодическая контрольная поверка и.т.г.у. Для этого были изготовлены 12 так называемых “контрольных” или “эталонных” калориметрических датчиков теплового потока (рис. 3).

Датчики представляют собой медные цилиндры диаметром 1.65–1.67 мм и длиной от 1.67 до 2.30 мм, вклеенные смолой Т-111 в отверстия на диске диаметром 40 мм и толщиной 10 мм из теплоустойчивого материала — полиимида. Все цилиндры перед установкой на диск взвешивались на аналитических весах с точностью ± 0.1 мг. Медь была выбрана в качестве материала датчика, так как ее теплофизические свойства достаточно хорошо известны в широком диапазоне температур. К боковой поверхности медных цилиндров припаяны термопары “хромель—копель” диаметром 0.1 мм, предварительно раскатанные до полосок фольги толщиной 0.03 мм.

По результатам измерений размеров и веса цилиндрических калориметров можно достаточно точно найти их теплоемкость и отсюда рассчитать их индивидуальные градуировочные коэффициенты K_k , Вт · с/(см² · мВ).

Многократные градуировки и.т.г.у. в каждом выбранном режиме нагрева с помощью всех 12-ти контрольных датчиков и последующая статистическая обработка результатов позволили уменьшить влияние на точность измерений q_d наличия клеевых соединений и пайки термопар и добиться разброса величин в пределах $\pm 3\%$.

Для градуировки и.т.г.у. по тепловым потокам необходимо было построить зависимость

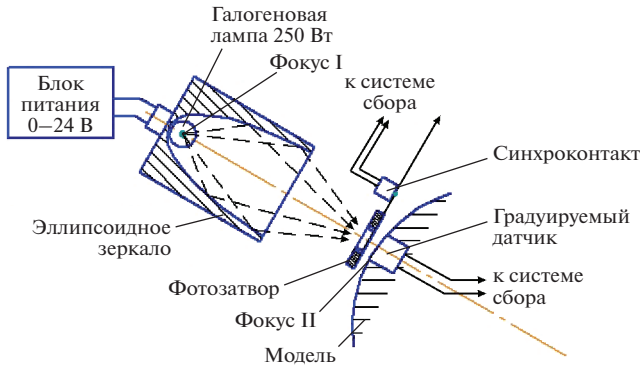


Рис. 4. Схема лучевого нагревателя.

$$q_d(u_p) \left[\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \right] = K_k \frac{du_k}{dT} \approx K_k \frac{\Delta u_k}{\Delta T}, \quad (4)$$

где K_k — коэффициент контрольного калориметрического датчика; u_p — показания датчика режима, т.е. термопары на выходе из сопла нагревателя; u_k — сигнал “эталонного” контрольного датчика.

При расчете градуировочных коэффициентов K_k контрольных датчиков учитывались потери тепла, передаваемого диску от боковой поверхности калориметров. Для этого использовалось известное уравнение, описывающее нестационарный перенос потока тепла в полуограниченное тело при заданной температуре его поверхности [2]:

$$q_n(t) = \frac{\varepsilon}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{dT}{dT} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}. \quad (5)$$

Здесь q_n — плотность теплового потока через боковую поверхность калориметра в полиимид (потери тепла); T — средняя температура калориметра, устанавливающаяся после его прогрева на всю глубину; $\varepsilon = \sqrt{\lambda \rho c} = 576 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \sqrt{\text{с}})$ — коэффициент тепловой активности “полиимида”, где λ , ρ и c — соответственно коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость материала.

Учитывая, что в течение 2–3 с температура калориметра практически линейно изменяется через каждые 0.1–0.2 с, т.е. $\frac{dT}{d\tau} \approx \text{const}$, и воспользовавшись выражением (5), можно оценить полные потери тепла контрольным датчиком:

$$Q_n = 2d_0 l \varepsilon \sqrt{\pi T} \frac{dT}{d\tau}, \quad (6)$$

где d_0 и l — диаметр и длина медного цилиндра.

Количество тепла, накопленного калориметром, определяется как

$$Q_n = \rho_2 c_2 l \frac{\pi d_0^2}{4} \frac{dT}{d\tau}, \quad (7)$$

где ρ_2 и c_2 — соответственно плотность и удельная теплоемкость меди.

Коэффициент контрольного (“эталонного”) датчика равен

$$K_k = \frac{Q_k + Q_n}{\frac{\pi d_1^2}{4} K_t \frac{dT}{d\tau}}, \quad (8)$$

где d_1 — диаметр воспринимающей тепло поверхности (отличается от d_0); $K_t = 0.067 \text{ мВ/К}$ — коэффициент термо-э.д.с. хромель-копелевой термопары вблизи 20°C.

Оценка влияния слоя припоя, которым припаивались термопары к калориметрам, на коэффициенты контрольных датчиков показала, что связанная с этим поправка для всех датчиков не превышает 1.4%. Градуировочную характеристику и.т.г.у. со стационарным нагревателем можно достаточно точно аппроксимировать линейной функцией

$$q_d = 5.12 u_p. \quad (9)$$

4. СВЕТОЛУЧЕВОЙ НАГРЕВАТЕЛЬ

К недостаткам и.т.г.у., которые трудно устранить при использовании стационарного нагревателя, следует отнести узкий диапазон задаваемых рабочих параметров (1–15 Вт/см²) и большое время выхода на рабочий режим (около 1 ч). Поэтому при модернизации установки был изготовлен действующий макет светолучевого нагревателя, в котором использованы половина эллипсоидного зеркала и галогеновая лампа накаливания мощностью 250 Вт (рис. 4).

Особенность нагревателя заключается в том, что максимум излучения вольфрамовой спирали лампы приходится на инфракрасную область (~3000 К), а кварцевая колба лампы пропускает только ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный спектры излучения ($0.2 < \lambda < 2 \text{ мкм}$). Поэтому для нагрева датчика удастся использовать только часть электрической мощности, затрачиваемой на нагрев спирали, заметная доля тепла тратится на нагрев зеркала и потери в окружающую среду. В качестве сигнала u_p в светолучевом нагревателе использовано значение регулируемого напряжения накала галогеновой лампы.

Градуировку светолучевого нагревателя проводили следующим образом. Поверхность контрольного датчика последовательно зачерняли, затем его нагревали последовательно как обычным конвективным, так и светолучевым нагревателем. Это позволило оценить значения тепловых потоков, создаваемых светолучевым нагревателем.

Светолучевой нагреватель по сравнению с конвективным имеет ряд преимуществ. Во-первых, он создает на градуируемом датчике в течение 1–2 с практически постоянный тепловой поток, что позволяет при обработке данных использовать граничные условия второго рода: $q = \text{const}$ [3]; а во-вторых, обеспечивает более широкий диапазон задаваемых величин плотности теплового потока. Кроме того, светолучевой нагреватель выходит на стационарный рабочий режим через 1–2 с после включения напряжения накала лампы, в то время как омический нагреватель — через ~1 ч, а высокая скорость срабатывания фотозатвора (менее 1 мс) позволяет испытывать работоспособность малоинерционных датчиков. Однако в последнем случае, в отличие от конвективного нагрева, возникают сложности, связанные с необходимостью учета степени черноты нагреваемого датчика и влияния сравнительно медленного прогрева кварцевой колбы галогеновой лампы.

Испытания действующего макета светолучевого нагревателя показали, что интенсивность теплового потока к зачерненной матовой поверхности достигала 25 Вт/см², время выхода на квазистационарный режим — около 1 с, а длительность фронта нарастания ступенчатого теплового импульса соответствовала времени открытия затвора и не превышала 0.1 мс.

5. ГИБКИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ НАГРЕВАТЕЛЬ ВОЗДУХА

Наряду со светолучевым нагревателем в дополнение к стационарному был разработан и изготовлен гибкий электрический нагреватель воздуха. В нем использована гофрированная трубка из нержавеющей стали диаметром 16 мм и длиной 2 м.

Входной конец гофрированной трубки присоединен к выходному соплу стационарного нагревателя (сопло датчика режима при этом закрывается заглушкой). Выходной ее конец соединен с новым сопловым механизмом, оснащенным тремя сменными соплами с диаметрами 3, 4 и 5 мм, внутренний контур которых выполнен по профилю Витошинского [3].

К концевым штуцерам гофрированной трубки точечной сваркой прикреплены шины из нержавеющей стали, соединенные с токоподводящими проводами, имеющими термостойкую электроизоляцию. Для питания гибкого нагревателя используется источник постоянного напряжения с выходным током от 0 до 30 А. Внутри концевых штуцеров в нержавеющей капиллярах размещены спай хромель-копелевых термопар для измерения температуры воздуха на входе и выходе гибкого нагревателя. Датчиком режима в гибком нагревателе служит хромель-копелевая термопара, установленная на входе в сопло.

Гофрированную трубку и воздух, который выходит из гибкого нагревателя, можно нагревать до температуры 500–550°C (температура нагрева ограничена теплостойкостью гофрированной трубки из нержавеющей стали). Снаружи гофрированная трубка покрыта многослойной теплоизоляцией, состоящей из минеральной ваты, алюминиевой фольги, стеклоткани и хлопчатобумажной ткани. При общей толщине изоляции 42 мм температура наружной поверхности не поднимается выше 67°C.

На фиксированном расстоянии 60 мм от гибкого нагревателя с помощью хомутов на трубке закреплен шланг для подачи холодного сжатого воздуха от отсечного клапана к щелевому соплу, обеспечивающему “холодную завесу” перед градуируемым датчиком. На входе щелевого сопла также установлена хромель-копелевая термопара в нержавеющей капилляре, которая используется для контроля температуры “холодной завесы”.

Щелевое и выходное сопла крепятся на стойке, имеющей два фиксированных положения: “прицеливания” и рабочее положение. В положении “прицеливания” сопло сдвигается назад на фиксированное расстояние, и на его место выдвигается фторопластовая игла, острие которой, перемещая штатив, необходимо установить точно по центру поверхности градуируемого датчика. Стойка и штатив, на котором крепится игла, обладают достаточным числом степеней свободы для таких перемещений. При этом предполагается, что градуируемая модель неподвижно установлена на стапеле. Если модель невелика и допускает возможность фиксированных перемещений, то задача “прицеливания” дополнительно упрощается. На тыльной стороне иглы прицеливания установлен отбойник горячей струи сферической формы, чтобы исключить нагрев градуируемого датчика на этапе “прицеливания”. После завершения процедуры “прицеливания” на градуируемый датчик подается поток холодного воздуха, игла сдвигается назад, а на ее место выдвигаются рабочее и щелевое сопла. Для подачи на датчик теплового импульса (отключения подачи холодного воздуха) используются имеющиеся на стационарном нагревателе отсечной клапан и пневмокнопка (см. рис. 2). Поскольку избыточное давление на входе в щелевое сопло составляет 0.4–0.5 атм, а на коническом сопле давление <0.05 атм, холодная “завеса” надежно защищает градуируемый датчик от нагрева вплоть до срабатывания отсечного клапана.

6. ПАРАМЕТРЫ И.Т.Г.У. С ГИБКИМ НАГРЕВАТЕЛЕМ

Для определения характеристик модернизированной и.т.г.у. с гибким нагревателем был проведен полный цикл градуировочных исследований: измерено распределение полей температур и теп-

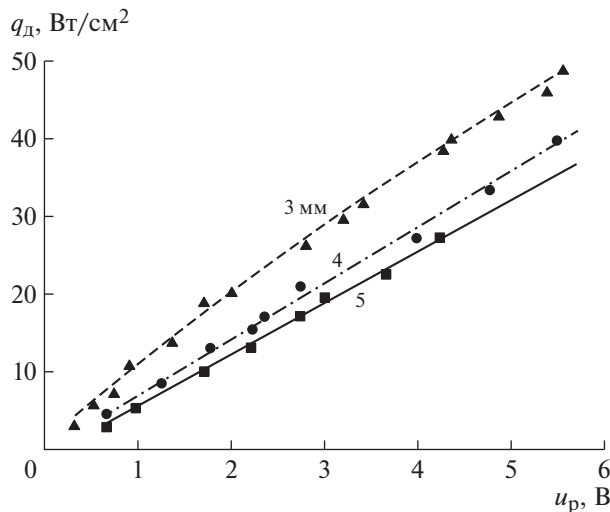


Рис. 5. Градуировка и.т.г.у с соплами различного диаметра (цифры у кривых).

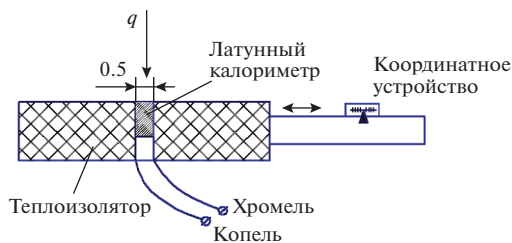


Рис. 6. Микрокалориметр для измерения распределения тепловых потоков.

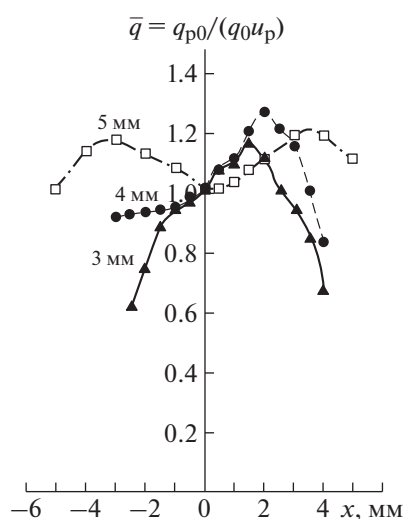


Рис. 7. Профили плотностей тепловых потоков по сечению струи для сопел различного диаметра (цифры у кривых).

ловых потоков по сечению струй, истекающих из сменных сопел диаметром 3, 4 и 5 мм, а также определены эмпирические зависимости тепловых потоков и температур от показаний “датчика режима” — термопары на выходе из гибкого нагревателя. Для этого использовались контрольные (“эталонные”) датчики теплового потока (см. разд. 3), специальный зонд-калориметр диаметром 0.5 мм и ленточная хромель-копелевая термопара толщиной 0.04 мм, которая была приварена к упругим траверсам диаметром 1 мм из этих же сплавов.

Результаты измерения тепловых потоков контрольными датчиками представлены на графиках (рис. 5).

В отличие от установки со стационарным нагревателем, градуировочная характеристика и.т.г.у. с соплом диаметром 3 мм заметно нелинейна, так что для ее описания приходится использовать более сложное выражение:

$$\text{в точке } x = y = z = 0 \begin{cases} q_{d3} = 12u_p - 2u_p^{1.4}, \\ q_{d4} = 7u_p, \\ q_{d5} = 6u_p. \end{cases} \quad (10)$$

Градуировочные характеристики и.т.г.у. при использовании сопел больших диаметров, 4 и 5 мм, остаются линейными.

В дополнение к измерениям зависимости плотности теплового потока от показаний датчика режима (термопары перед соплом нагревателя) были проведены измерения профиля тепловых потоков по всем трем направлениям относительно точки установки градуируемого датчика (10 мм от среза сопла). Для этого использовался миниатюрный калориметрический датчик (рис. 6) с диаметром тепловоспринимающей поверхности 0.5 мм. Датчик перемещали вдоль и поперек струи воздуха, истекающей из сопла, с помощью ручного координатного устройства. Полученные зависимости представлены на рис. 7.

Учитывая, что режим нагрева установки во время измерений мог меняться, потребовалось проводить нормализацию зарегистрированных сигналов:

$$\bar{q}_d(x) = \frac{q_d(x)u_{p0}}{q_{d0}u_p(x)}, \quad (11)$$

где u_{p0} — показания датчика режима при измерении q_0 в точке ($x = y = z = 0$); $u_p(x)$ — показания датчика режима в момент измерения $q_d(x)$ в точке $x \neq 0$.

Существенная неоднородность и некоторая асимметрия профиля теплового потока (см. рис. 7) обусловлены, по-видимому, несимметричным интенсивным теплоотводом в сопловом механизме и несовпадением геометрической оси сопла с

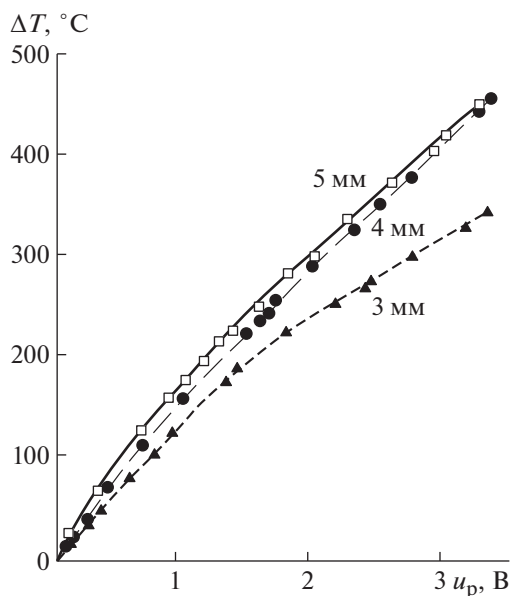


Рис. 8. Результаты измерения температуры в точке $x = y = z = 0$ для сопел разного диаметра (цифры у кривых).

осью струи воздуха. Последнее уменьшается коррекцией координаты x на 1–1.5 мм. В пределах диаметра воспринимающей тепло поверхности (0.8–3 мм) реальных калориметрических датчиков неоднородность пятна нагрева укладывается в пределы погрешностей: $\pm(5-8)\%$ для сопла $\varnothing 3$ мм; $\pm(8-12)\%$ для сопла $\varnothing 4$ мм; $\pm(3-5)\%$ для сопла $\varnothing 5$ мм. Для градуируемых датчиков больших размеров потребуется дополнительная теплоизоляция внешней поверхности сопла и проведение дальнейших исследований.

Так как граничные условия, задаваемые и.т.г.у. при градуировке датчика, соответствуют по классификации [3] условиям III рода (постоянные коэффициенты теплоотдачи α и температура потока), потребовалось провести измерения температуры воздуха, истекающего из сопла. Измерения проводились с помощью специальной ленточной хромель-копелевой термопары, которая устанавливалась на координатном устройстве в точке $x = y = z = 0$ (10 мм от сопла). Результаты измерения температуры в этой точке для всех трех сопел представлены на рис. 8. Здесь также отмечается существенная нелинейность зависимости от u_p , которую можно описать выражениями вида (для сопел $\varnothing 3, 4$ и 5 мм соответственно):

$$\text{в точке } x = y = z = 0 \begin{cases} \Delta T_3 = T_n - T_{\text{комн}} = 140u_p - 30u_p^{1.58}, \\ \Delta T_4 = 170u_p - 42u_p^{1.3}, \\ \Delta T_5 = 180u_p - 38u_p^{1.3}. \end{cases} \quad (12)$$

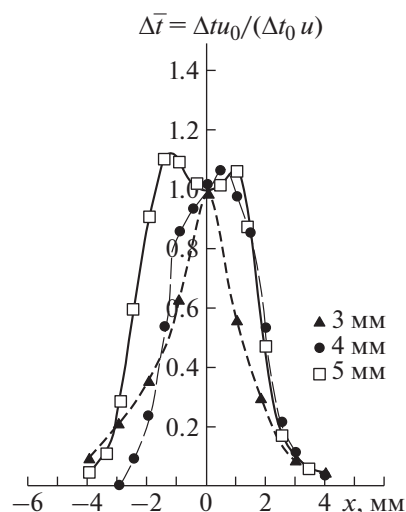


Рис. 9. Результаты измерения профилей температуры в струе по сечению для сопел разного диаметра.

Были измерены также нормированные профили температуры в струе по трем координатам x, y, z с использованием зависимости

$$\overline{\Delta T_n} = \frac{\Delta T_n(x) u_{p0}}{\Delta T_n(0) u_p}. \quad (13)$$

На рис. 9 показаны температурные профили по координате x . Следует отметить корреляцию результатов измерений профилей тепловых потоков и температуры на рис. 7 и 9.

Из зависимостей (2), (10), (12) можно найти значения коэффициентов теплоотдачи для всех трех сопел. Полученные значения практически не менялись во всем диапазоне изменений u_p . Таким образом, эмпирические зависимости (10), (12) позволяют определить граничные условия III рода, задаваемые и.т.г.у. на любом градуируемом датчике теплового потока. Время выхода гибкого нагревателя на стационарный режим составляет 5 мин.

Сравнение характеристик стационарного, светолучевого и гибкого нагревателей приведено в табл. 1. Согласно таблице, и светолучевой, и, особенно, гибкий нагреватели превосходят по своим характеристикам стационарный нагреватель. Кроме того, при их использовании нет ограничения на размеры градуируемых моделей, тогда как для стационарного нагревателя размеры не должны превышать 0.5 м.

Все градуировки датчиков теплового потока проводились при ортогональном растекании нагретой струи воздуха по плоской поверхности модели. Картина теплообмена еще более усложняется при взаимодействии струи с криволинейными поверхностями. Экспериментальная проверка

Таблица 1.

Характеристики нагревателей	Стационарный нагреватель	Гибкий нагреватель	Светолучевой нагреватель
Диапазон плотности теплового потока, Вт/см ²	0.01–15	0.01–50	0.001–25
Время выхода на стационарный режим	1 ч	5 мин	2 с
Случайная погрешность определения градуировочного коэффициента датчиков теплового потока, %	3	3	3
Длительность теплового импульса, мс	10–∞	10–∞	0.1–∞
Длительность переднего фронта импульса, мс	1	1	<0.1
Максимальная температура струи нагретого воздуха, °С	350	550	—
Давление сжатого воздуха на входе в установку, ати	>3	>3	—
Давление сжатого воздуха перед соплом, ати	<0.05	<0.05	—
Потребляемая мощность, Вт	300	640	250

влияния кривизны поверхности позволила ввести эмпирические поправки в величину теплового потока в зависимости от радиуса сферической и цилиндрической стенок. Так, для сопла Ø3 мм поправки составили:

— для сферической стенки

$$q_{д_сф} = q_d \exp(3/R^2),$$

— для цилиндрической

$$q_{д_ц} = q_d \exp(4/R^2), \quad (14)$$

где $R > 2$ мм — радиус кривизны стенки.

Длительные повторные градуировки датчиков на различных моделях показали, что случайные погрешности определения индивидуальных градуировочных коэффициентов K_d не выходят за

пределы $\pm 3\%$ для нагревателей всех трех типов. В пределах рабочих параметров и т.г.у. со стационарным и гибким нагревателями может использоваться для задания ступенчатых импульсов конвективного теплового потока при граничных условиях III рода, а со светолучевым нагревателем — при граничных условиях I рода [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов В.В., Колочинский Ю.Ю., Плешакова А.А. // Труды ЦАГИ. 1979. Вып. № 1978. С. 120.
2. Эртель Х. // Физика быстротекущих процессов. Пер. с англ. Т. 3 / Под ред. Н.А. Златина. М.: Мир, 1971. С. 180.
3. Быркин А.П., Кудрявцева Л.И., Пономарев С.П., Якушева В.Л. // Ученые записки ЦАГИ. 1983. Т. XIV. № 5. С. 40.