

УДК 536.24:681.121

ЗАДАЧА КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА ОБТЕКАЕМОЙ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ В ОПТИЧЕСКОМ РАСХОДОМЕРЕ ГАЗА И ЖИДКОСТИ

О. Ю. Семенов, А. И. Дёмко

*Сургутский государственный университет,
ous.tutor.phinma@mail.ru*

Рассмотрена задача конвективного теплообмена на обтекаемой плоской пластине в оптическом расходомере газа и жидкости. Предложен способ измерения скорости потока по изменению поперечного градиента температуры. Исследована зависимость углового отклонения луча лазера от скорости потока с учетом закономерностей теплообмена при свободной конвекции. Обнаружено, что распределение температуры очень неустойчиво по отношению к скорости течения воздуха в измерительной ячейке. Показана возможность разработки лазерного расходомера для измерения небольших расходов газа. Определены границы применимости предлагаемого метода измерений.

Ключевые слова: теплообмен, конвекция, диагностика, расходомер, лазер, световой луч, газ, эффект Пельтье, жидкость, оптическая неоднородность.

PROBLEM OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER ON STREAMLINED FLAT PLATE IN OPTICAL FLOW METER OF GAS AND LIQUID

O. Yu. Semenov, A. I. Dyomko

*Surgut State University,
ous.tutor.phinma@mail.ru*

The article considers the problem of convective heat transfer on a streamlined flat plate in an optical flowmeter of gas and liquid. A method for measuring the flow velocity by changing the transverse temperature gradient is proposed. The dependence of the angular deviation of the laser beam on the flow velocity is studied taking into account the laws of heat transfer during free convection. The unstable temperature distribution for the air flow rate in the measuring cell is found. The possibility of developing a laser flow meter for measuring small gas flow rates are shown. The applicability limits of the proposed measurement method are determined.

Keywords: heat transfer, convection, diagnostics, flow meter, laser, light beam, gas, Peltier effect, liquid, optical heterogeneity.

На промышленных предприятиях, в сфере жилищно-коммунального хозяйства и научных исследованиях используются расходомеры различных типов: турбинные преобразователи расхода, вихревые преобразователи на сужающих устройствах, ультразвуковые и др. Каждый из рассматриваемых типов расходомеров имеет свои преимущества и недостатки, связанные с возмущением измеряемого потока и погрешностями измерений. В настоящее время актуальной технической задачей является создание высокоточных приборов для измерения концентрации, объемного расхода, скорости газа и жидкости, которая может быть решена путем использования физических процессов, связанных с конвективным теплообменом вблизи обтекаемой поверхности. Трудностью применения процессов теплообмена является выбор оптимальных размеров измерительного модуля, при которых чувствительность прибора остается высокой, а также учет процессов теплопередачи при переходе течения из ламинарного режима в турбулентный.

Задача применения малогабаритных приборов для обнаружения утечек нефти и газа является важной с точки зрения производственного мониторинга и экологической безопас-

ности работы трубопроводов. Авторами работ [1–25] рассматриваются физические методы и приборы индикации паров углеводородов в местах утечек из нефтегазопроводов; в работах исследованы лазерные оптические методы измерения концентрации и температуры нефти и газов. Оптические методы диагностики потоков достаточно развиты для целей определения физических параметров среды. Под оптической диагностикой газовых потоков понимают способ измерения какого-либо одного из параметров, например, скорости или температуры [1–7]. Для обнаружения и измерения неоднородностей в исследуемом течении жидкости или газа применяются оптические методы диагностики: лазерная доплеровская анемометрия, лазерно-локационные, интерференционные, пирометрические и тепловизионные методы, позволяющие определять распределение этого параметра в большом объеме потока. На практике в основном применяются две конструктивные разновидности оптических расходомеров: доплеровские расходомеры, работа которых основана на фиксации разных частот при отражении светового луча движущимися объектами потока, и расходомеры на эффекте Физо – Френеля, в которых измеряется один из параметров, связанный с зависимостью скорости света в движущейся среде от скорости ее движения.

Рассмотрим режимы и параметры течений при теплообмене стенок трубы с газом или жидкостью. Различные значения температуры обусловлены развитием конвективного теплообмена в движущейся среде. Применение зависимости угла отклонения луча лазера в оптической среде от изменения температуры, показателя преломления и плотности среды дает возможность разработать новый тип расходомеров жидкости и газа. Для вычисления параметров различных сред необходимо иметь систему уравнений, описывающую k количественных связей между искомыми термодинамическими параметрами среды, и одно соотношение, связывающее термодинамический параметр с угловым отклонением луча света. В этом случае погрешность метода диагностики будет складываться из погрешностей оптических измерений, математических соотношений, связывающих k термодинамических параметров среды, и погрешностей в реализации ламинарного или турбулентного течения.

Используем задачу конвективного теплообмена на обтекаемой плоской пластине при турбулентном и ламинарном видах течения, определяющую связь скорости потока и градиента температуры [8–17]. Задача заключается в определении закона, описывающего зависи-

мости числа Нуссельта $Nu = \frac{\alpha l_0}{\lambda}$ от числа Прандтля $Pr = \frac{\nu}{a}$ в ламинарном или турбулентном

слое при больших значениях числа Прандтля Nu и числа Рейнольдса $Re = \frac{v_0 l_0}{\nu}$, где величи-

ны α , l_0 , λ , a , v_0 и ν – коэффициент теплоотдачи, длина обтекаемой поверхности плоской пластины, коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности, скорость потока и коэффициент кинематической вязкости соответственно. Схема, поясняющая решение данной задачи, представлена на рис. 1.

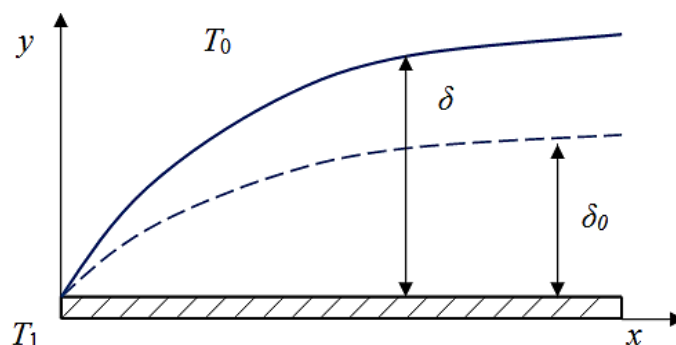


Рис. 1. Схема решения задачи о конвективном теплообмене на плоской поверхности

Для решения данной задачи применим формулу, позволяющую определить толщину пограничного слоя на обтекаемой поверхности пластины δ . При больших числах Прандтля: $a \leq \nu$, толщина теплового пограничного слоя меньше толщины динамического пограничного слоя: $\delta_0 \leq \delta$. При значениях $y = 0 \div \delta_0$ температура меняется в соответствии $T_1 - T_0$. Скорость потока (1) на том же расстоянии испытывает изменение порядка:

$$v = v_0 \frac{\delta_0}{\delta}, \quad (1)$$

При $y = \delta_0$ уравнение теплового пограничного слоя (2) примет вид:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}. \quad (2)$$

Толщина пограничного слоя (3) на обтекаемой поверхности

$$\delta \approx \sqrt{\frac{\nu \cdot l_0}{v_0}} = \sqrt{\frac{\nu \cdot l_0^2}{v_0 l_0}} = \frac{l_0}{\sqrt{\text{Re}}}, \quad (3)$$

порядки величин u и a :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} = v_0 \frac{\delta_0}{\delta} \cdot \frac{T_1 - T_0}{l_0}, \quad a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = a \frac{T_1 - T_0}{\delta_0^2}. \quad (4)$$

Сравнивая правые части (4), получим

$$\delta_0^3 = \frac{a \delta l_0}{v_0} = \frac{1}{\text{Pr}} \frac{l^3}{\sqrt{\text{Re}}^3} \quad (5)$$

или

$$\delta_0 \approx \frac{1}{\text{Pr}^{1/3}} \frac{l}{\sqrt{\text{Re}}}. \quad (6)$$

Из выражения (5) следует, что вертикальная составляющая температурного пограничного слоя уменьшается пропорционально обратной величине корня квадратного из числа Рейнольдса. Поток тепла на поверхности пластины равен:

$$\text{Nu} = q \approx \lambda \frac{T_1 - T_0}{\delta_0} = \text{const} \text{Pr}^{1/3} \text{Re}^{1/2}. \quad (7)$$

Уравнения с величиной δ (5) и (6) определяют прямую связь градиента температуры $\frac{T_1 - T_0}{\delta_0}$ и отклонения лазерного луча в пограничном слое со скоростью потока.

Для создания модели лазерного расходомера важным является расчет его работы в устойчивом режиме, т. к. изменение работы расходомера влечет за собой изменение теплопередачи. При смене режима течения коэффициент теплоотдачи изменяется ступенчато, что обусловлено перестройкой структуры течения [8]. Ламинарный слой становится турбулентным, вследствие чего изменяются толщина пограничного слоя и распределение температуры в этом слое. Если ширина трубы для измерений небольшого диаметра, то тепловой погра-

нический слой будет сравним с ее поперечными размерами, а градиент температуры будет увеличиваться с увеличением скорости потока газа или жидкости (7).

В ходе работы были решены следующие экспериментальные задачи: разработка методики создания ламинарного течения в измерительной ячейке путем введения в нее струи воздуха от источника, находящегося на различных расстояниях от входной части ячейки; измерение скорости входного потока с помощью стандартного расходомера; опытное исследование влияния определяющих параметров установки от зависимости угла отклонения луча; разработка метода использования модулей Пельтье для проверки зависимости градиента температуры от условий конвективного теплообмена.

В работе использовалась измерительная ячейка расходомера, учитывались ее параметры, а также модули Пельтье. Датчик на основе модулей Пельтье выполняет две функции: первая из них заключается в контроле изменения градиента температур при конвективном теплообмене, вторая – в проверке возможности увеличения напряжения между поверхностями модулей при изменении градиента температур в потоке. В отличие от углового отклонения лазерного луча модули Пельтье обладают большей инерционностью и малой чувствительностью по отношению к колебаниям скорости и температуры в потоке газа. Работа измерительной ячейки определяется ее геометрическими размерами, разностью температур между нагреваемой и охлаждаемой поверхностью пластин, расстоянием между выходной частью ячейки и экраном, а также скоростью потока воздуха в пространстве между поверхностями ячейки.

Эксперименты проводили в два этапа: первый заключался в определении необходимых параметров установки для проведения измерений скорости потока; второй – в непосредственном измерении скорости воздуха, продуваемого через измерительную ячейку. Для решения вопроса с фактором неопределенности характера течения в измерительном канале-трубе была поставлена задача конвективного теплообмена на обтекаемой плоской пластине при малых числах Рейнольдса, т. е. необходимо было определить предельный закон зависимости числа Нуссельта от числа Прандтля, равного единице при небольших числах Рейнольдса при ламинарном пограничном слое в измеряемом объеме.

Измерения коэффициента теплоотдачи производят с помощью закона Ньютона – Рихмана:

$$q = \alpha(T_0 - T), \quad (8)$$

где q – тепловой поток на переходе «твердое тело – среда – газ или жидкость», α – коэффициент теплоотдачи, T_0 и T – температуры поверхности тела и среды.

Коэффициент теплоотдачи также равен:

$$q = c_p \rho v_0 (T_0 - T). \quad (9)$$

Тепловые потоки вычисляют на основании закона Фурье:

$$q = \chi \frac{dT}{dx}, \quad (10)$$

где χ – коэффициент теплопроводности.

Приравнявая выражения (8) и (9) для тепловых потоков, получим

$$\alpha \approx c_p \rho v_0. \quad (11)$$

Полученное соотношение (11) определяет возможность проведения измерений коэффициента теплоотдачи, так как очевидна прямая связь между скоростью потока в измерительной ячейке и коэффициентом теплоотдачи с учетом тепловых потоков (10).

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки для лазерного измерения скорости потока.

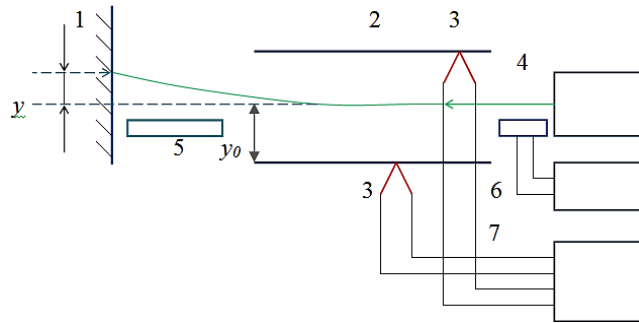


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для лазерного измерения скорости потока:

1 – измерительный экран; 2 – измерительная ячейка; 3 – термопары;
4 – лазер; 5 – компрессор; 6 – термоанемометр; 7 – источник питания термопар

Экспериментальная установка состоит из измерительного экрана, находящегося на расстоянии 3 м от измерительной ячейки (большое расстояние обеспечивало большее отклонение луча и, соответственно, меньшую погрешность измерения углового отклонения); измерительной ячейки (была собрана из прямоугольного канала-трубы с подогреваемой снизу стенкой); термопары (установлена на внутренних поверхностях стенок трубы-канала); оптического лазера; эталонного измерителя скорости потока – модуля Пельтье или термоанемометра; источника э.д.с. для питания термопар; компрессора, создающего проток воздуха в измерительной ячейке.

Нижняя сторона измерительной ячейки и луч оптического лазера устанавливались параллельно нижней стенке изучаемого канала-трубы. В экспериментах использовались перемещения лазерного луча в перпендикулярном направлении к нижней стороне канала-трубы, что позволяло измерять градиент температуры в различных сечениях трубы. Температуру нижней стенки в измеряемом канале регулировали с помощью изменения подаваемого напряжения на нагревателе. Отклонение луча лазера в сторону холодных слоев воздуха фиксировали с помощью миллиметровой измерительной шкалы.

Измерительная ячейка представляла собой прямоугольную трубу длиной 1,320 м. Поперечное сечение трубы равно $0,014 \times 0,038$ м. Размеры измерительной ячейки были равны $\sqrt{0,014 \cdot 0,0275} \approx 0,02$ м, а вязкость воздуха принята равной $4 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Тогда критическое число Рейнольдса $Re = 2\,400$ будет достигаться при скорости, равной 0,28 м/с.

Модули Пельтье состояли из трех прижатых друг к другу пластин. Схема их соединения показана на рис. 3. Верхняя поверхность модуля с меньшей температурой T_1 располагалась со стороны охлаждаемой стенки измерительной ячейки, а поверхность модуля с большей температурой T_2 располагалась со стороны нагреваемой стенки. При таком соединении и расположении модулей в потоке достигали наибольшей разницы температур на крайних поверхностях модулей и наибольшей разности потенциалов на среднем модуле, что позволяло увеличить чувствительность теплового датчика.

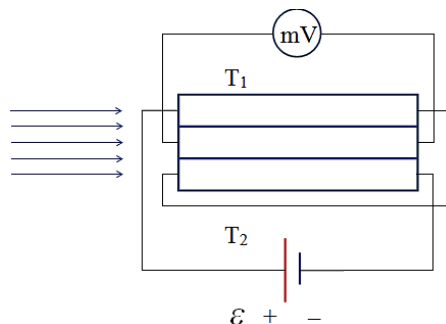


Рис. 3. Схема подключения модулей Пельтье в потоке воздуха

Характер течения на поверхностях с температурами T_1 и T_2 определяет скорость изменения температуры и позволяет вычислить распределение градиентов температур в поперечном сечении измерительной ячейки. Непрерывное распределение градиента температур невозможно при турбулентном перемешивании воздуха в измерительной ячейке. В этом случае необходимо использовать среднюю по размерам трубы величину градиента температуры. Величина э.д.с. ε , снимаемая с поверхностей центрального модуля Пельтье, пропорциональна разности температур $(T_2 - T_1)$ и толщине пакета d , состоящего из трех модулей Пельтье. Методическая погрешность измерения (12) среднего по сечению значения э.д.с. будет пропорциональна толщине пакета из трех модулей Пельтье:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\Delta T_1}{T_1} + \frac{\Delta T_2}{T_2} + \frac{\Delta d}{d}. \quad (12)$$

С целью выяснения роли определяющих физических параметров установки эксперименты проводили при различной температуре нагрева нижней поверхности измерительной ячейки, скорости продувки воздуха и различном расположении линии прохождения луча лазера. Для уменьшения погрешностей измерений градиент скорости измеряли двумя способами: первый способ – косвенный – основан на измерении угловых отклонений луча, а второй – на использовании метода модулей Пельтье. Рабочим режимом в экспериментах являлось стационарное распределение температур и скоростей в измерительной ячейке, которое в силу инертности измерительной системы достигается по истечении определенного времени.

На рис. 4 представлены результаты измерения угловых отклонений луча лазера при различной температуре нижней стенки трубы в период ее нагревания и охлаждения.

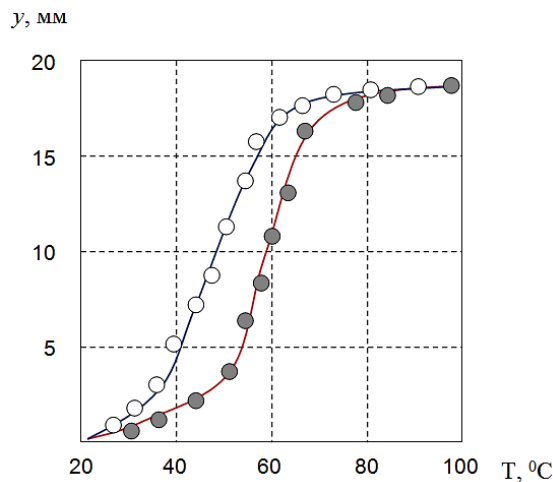


Рис. 4. Зависимость угловых отклонений луча лазера от температуры нижней стенки при ее нагревании и охлаждении:
● – период нагревания трубы; ○ – период охлаждения трубы

Вертикальная координата линии распространения луча равнялась нулю: $y_0 = 0$. Обратный ход отмечен темными точками. Обнаружена гистерезисная зависимость, типичная для процессов теплообмена, связанных с накоплением тепла в системе и сохранением термодинамической устойчивости. В процессе динамического равновесия температура воздуха в определенной точке измерительной ячейки претерпевает периодические изменения, и наличие гистерезиса является одним из факторов, уменьшающих погрешность измерений, когда температура поверхности стенки нестабильна.

Результаты измерений углового отклонения луча лазера представлены на рис. 5, из графиков видно, что угловое отклонение в вертикальном направлении изменяется нелинейно. Поскольку угловое отклонение определяется градиентом температуры, то важной представляется зависимость градиента температуры от координаты:

$$T = T(y_0). \quad (13)$$

В уравнении $y = \frac{l}{n_0} \frac{\partial n}{\partial y}$ величины n_0 и n – показатели преломления воздуха в воздухе и измерительной ячейке, l – расстояние от выходной части измерительной ячейки до экрана. Зависимость показателя преломления воздуха от температуры определяется формулой:

$$\Delta n = \frac{(1 - n_0) \Delta T}{T}. \quad (14)$$

В формуле (14) изменение показателя преломления равно $\Delta n = (n - n_0)$, и изменение температуры соответствует значению $\Delta T = (T - T_0)$ в текущей точке с координатой z_0 .

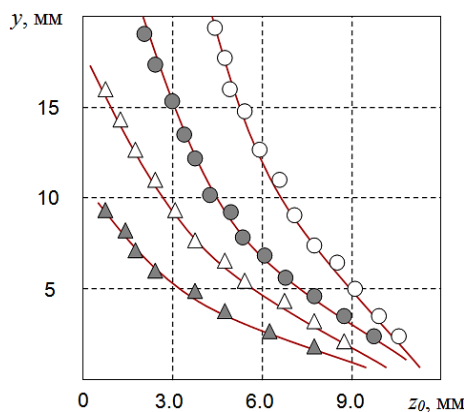


Рис. 5. Графики зависимости углового отклонения луча лазера от расстояния линии распространения луча до нижней стенки измерительной ячейки:
○ – 100 °C; ● – 90 °C; △ – 80 °C; ▲ – 50 °C

Результаты вычислений с учетом выражений (13) и (14) представлены на рис. 6. Из графиков видно, что градиент температуры незначительно изменяется в зависимости от положения линии распространения луча света.

Постоянство градиента температуры при постоянной координате z_0 позволяет использовать методику измерения углового отклонения луча лазера для диагностики распределения параметров в стратифицированной среде.

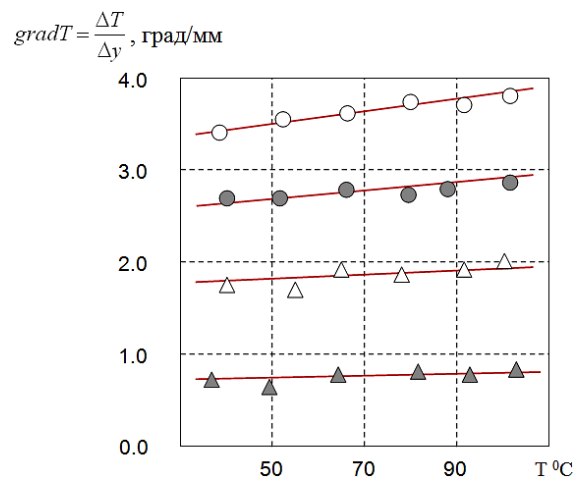


Рис. 6. Зависимости градиента температуры от температуры нижней стенки измерительной ячейки при различных расстояниях от линии распространения луча света до нижней стенки прямоугольной трубы: ○ – $z_0 = 3,0$ мм; ● – $z_0 = 6,0$ мм; △ – $z_0 = 9,0$ мм; ▲ – $z_0 = 12,0$ мм.

В задаче измерения скорости потока зависимость углового отклонения от скорости определяется экспериментально как интегральная характеристика, поэтому не вносит дополнительных погрешностей измерений. Погрешность измерений угловых отклонений луча связана с неустойчивостью теплового пограничного слоя и определяется градиентом температуры между верхней и нижней пластинами измерительной ячейки. Изменение статического равновесия воздуха в трубе приводит к конвективному перемешиванию воздуха в трубе и колебаниям углового отклонения луча света.

Средний градиент температуры изменяется в зависимости от вертикальной координаты положения луча лазера в измерительной ячейке по закону:

$$(gradT)_{cp} = \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} (gradT) dz, \quad (15)$$

где z_1 и z_2 – координаты нижней стенки трубы и луча лазера.

Результаты измерения разности потенциалов на поверхности центрального модуля Пельтье при различной скорости потока представлены на рис. 7. Из графика видно, что зависимость разности потенциалов от скорости потока нелинейная. В отличие от метода измерения скорости по угловому отклонению луча лазера в области малых скоростей, разность потенциалов увеличивается незначительно.

Точность измерения увеличивается при скоростях потока, превышающих 1 м/с. При больших скоростях потока, превышающих 8÷10 м/с, относительная погрешность измерений не превышает 2 %.

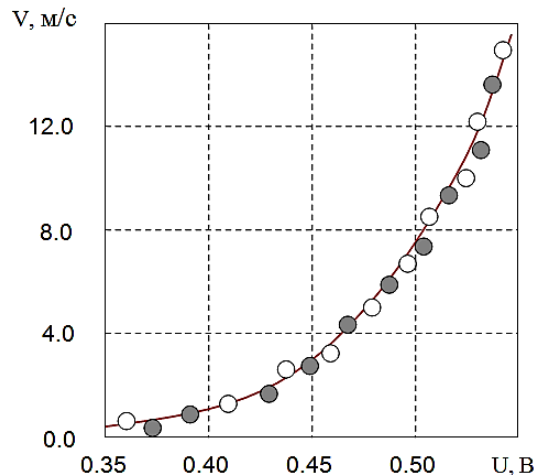


Рис. 7. Связь скорости потока и разности потенциалов на поверхностях модулей Пельтье:
○ – данные, полученные при нагревании нижней поверхности; ● – при охлаждении поверхности

Инерционность метода модулей Пельтье обусловлена большей по сравнению с воздухом теплоемкостью материала, из которого изготовлены модули. Физическая идея метода измерения скорости потока заключается в использовании зависимости интенсивности теплоотдачи от нагретой поверхности от скорости потока. Результаты измерений представлены графиками зависимости скорости потока от градиента температуры между нагреваемой и охлаждаемой поверхностями измерительной ячейки (рис. 7).

Полученная зависимость характеризуется высокой повторяемостью в опытах, когда течение в трубе отсутствует или скорость течения очень мала ($Re \approx 0$). Появление незначительной скорости потока в трубе приводит не к уменьшению, а к увеличению углового отклонения. Это может быть объяснено только увеличением градиента температуры. Увеличение градиента температуры в слое воздуха шириной, равной ширине луча лазера, может произойти из-за

усреднения максимального значения вблизи нижней стенки трубы и минимального значения вблизи верхней стенки трубы. Усреднение градиента температуры (15) и увеличение амплитуды колебаний углового отклонения луча обусловлены гидродинамической неустойчивостью нагретого слоя. Она определяется минимальным значением числа Рэлея [8]:

$$Ra = \frac{g\beta \cdot h^3(T_2 - T_1)}{\nu \cdot a} \cong 657,5. \quad (16)$$

В выражении (16) g – ускорение свободного падения, h – расстояние между нагреваемой и охлаждаемой стенками трубы, β – температурный коэффициент расширения воздуха, T_2 и T_1 – температуры нижней и верхней стенок трубы, ν и a – коэффициенты кинематической вязкости и температуропроводности воздуха. Вычислим минимальное число Рэлея, соответствующее геометрическим параметрам измерительной ячейки. Примем $h = 0,16 \cdot 10^{-3}$ м, $\beta = 3,4 \cdot 10^{-3}$, $T_2 = 100$ °С, $T_1 = 30$ °С, $\nu = 23,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $a = 33,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Тогда из (14) следует, что для условий экспериментов $Ra \cong 0,02$.

Действительно, при отсутствии течения в измерительной ячейке слой воздуха устойчив в гидродинамическом отношении. Оценим минимальные значения скоростей, при которых нарушается устойчивость слоя. Они будут определять границы применимости метода.

Наличие свободного и вынужденного конвективного движения существенно изменяет процесс теплообмена. Сложный характер теплообмена в переходной области затрудняет количественное описание процесса теплообмена. Обобщенные методики расчета в переходной области представлены в литературе недостаточно, поэтому используется приближенная оценка наибольшего и наименьшего коэффициентов теплообмена, которая может быть произведена по формуле турбулентного и вязкостного теплообмена:

$$Nu = 0,017 Re^{0,8} Pr^{0,4} (d_2 / d_1)^{0,18}. \quad (17)$$

Здесь $Pr \approx 1$ – отношение коэффициента вязкости к коэффициенту температуропроводности воздуха при данной температуре, $(d_2 / d_1) = 2,7$ – отношение размеров трубы в поперечном сечении.

Согласно [8–10], наибольшее значение коэффициента теплоотдачи при переходном режиме в условиях свободной конвекции описывается уравнением

$$Nu = 1,18 Ra^{1/8}. \quad (18)$$

Подставляя в (18) критическое число Рэлея $Ra \cong 657,5$, получим $Nu = 2,66$. Используя полученное значение числа Нуссельта и формулу для коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции (17), получим диапазон допустимых чисел Рейнольдса: $Re < 400$. Этому диапазону чисел Рейнольдса соответствует интервал допустимых абсолютных значений скорости потока: $v < 0,6$ м/с.

Областью применения предлагаемого расходомера является измерение скоростей потока и коэффициентов теплоотдачи на поверхностях тел при свободной конвекции. Сравним слагаемые в уравнении свободной конвекции, описывающие ускорение потока под действием инерционных сил $v \frac{\partial v}{\partial z}$ и сил Архимеда g для выражения (19). Заменим производную скорости по координате конечным отношением характерных величин скорости и геометрических размеров $\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{v}{d}$ и получим:

$$v = \sqrt{gd}. \quad (19)$$

Подставляя в полученное выражение средний размер поперечного сечения $d = \frac{d_1 + d_2}{2} = 2,5$, получим $v \cong 0,4 \div 0,5$ м/с.

Полученное значение скорости соответствует оценкам, сделанным на основании законов теплообмена, и экспериментальным результатам. Уменьшение поперечного сечения измерительной ячейки для увеличения порога неустойчивости теплового пограничного слоя, как следует из результатов эксперимента, не приводит к желаемому результату. Уменьшение скорости потока незначительно уменьшает амплитуду колебаний, а уменьшение вертикального размера измерительной ячейки приводит к тому, что луч лазера, отклоняясь, попадает на верхнюю стенку трубы. Уменьшение длины трубы вызывает уменьшение чувствительности исследуемого метода.

Решение проблемы видится в реализации нескольких подходов. Первый из них заключается в реализации многократного прохождения луча в измерительной ячейке. Это возможно осуществить, если на входной и выходной частях измерительной ячейки установить отражающие зеркала и диафрагму, уменьшающую диаметр луча лазера. Чувствительность прибора увеличится в N раз, где N – число отражений лазерного луча. При этом длина ячейки может быть уменьшена в N раз. Изменения конструкции потребуют значительной точности в изготовлении узлов и юстировке прибора.

Другим способом расширения диапазона измерений может являться применение шунта – параллельного участка трубы с измерительной ячейкой. Поперечное сечение шунтирующего участка трубы должно быть больше поперечного сечения измерительной ячейки. Отношение площадей поперечного сечения измерительной ячейки и шунтирующего участка трубы определяет увеличение диапазона измерений скорости потока.

Способом измерения скорости по угловому отклонению луча является изолирование участка трубы измерительной ячейки от измеряемого потока, т. е. нагреваемая стенка должна быть теплоизолированной от внешнего потока. Охлаждаемая стенка должна быть изготовлена из материала с большим коэффициентом теплопроводности, и ее толщина должна быть небольшой. Воздух или жидкость внутри изолированной измерительной ячейки остаются неподвижными.

Градиент температуры между двумя стенками трубы будет определяться лишь скоростью конвективного теплообмена охлаждаемой стенки во внешнем потоке и скоростью теплообмена, определяемой теплопроводностью рабочего тела (газа или жидкости) внутри измерительной ячейки. В этом случае связь скорости потока с градиентом температуры (угловым отклонением луча света) можно найти, приравняв выражение: $Nu = const(\chi \cdot gradT)$ и (17):

$$const(\chi \cdot gradT) = 0,017 Re^{0,8} Pr^{0,4} (d_2 / d_1)^{0,18}. \quad (20)$$

Тогда искомая скорость потока будет определяться выражением:

$$Re = \left(\frac{const(\chi \cdot gradT)}{0,017 Pr^{0,4} (d_2 / d_1)^{0,18}} \right)^{\frac{5}{4}}. \quad (21)$$

В выражении (21) неизвестная константа определяется из результатов экспериментов, учитывая связь скорости потока с угловым отклонением лазерного луча (20). Очевидно, что практическая реализация этой идеи требует дополнительных исследований и значительных материальных затрат, связанных с точностью изготовления рабочего макета прибора.

Следует отметить также, что изолирование внутренней части измерительной ячейки от внешнего течения позволит сделать его прибором погружного действия. Это означает, что его можно будет помещать непосредственно в измеряемый поток. Совместно с реализацией многократного прохождения луча в измерительной ячейке такой прибор будет отличаться высокой стабильностью показаний и его работа будет мало влиять на скорость потока.

Метод использования модулей Пельтье, по существу, является повторением предыдущего метода. Разница лишь в способе измерения градиента температур между нагреваемой и охлаждаемой стенками измерительной ячейки. Очевидно, что формула (21) также определяет эффективность работы пакета из трех модулей Пельтье. В этом случае градиент температуры вычисляется по разности температур на поверхностях модулей, обтекаемых потоком.

В работе рассматривается задача конвективного теплообмена в оптическом расходомере газа и жидкости, получены экспериментальные результаты измерения скорости потока по угловому отклонению лазерного луча и разности потенциалов в модулях Пельтье. Определена область применения лазерного расходомера, исследован диапазон измерений скорости потока, равный $0,5 \div 0,6$ м/с. Измерение больших по величине скоростей потока ограничивается явлениями неустойчивости теплового динамического пограничного слоя и переходом от ламинарного течения к турбулентному. Показана возможность создания лазерного расходомера.

Работа выполнена в рамках проекта в области фундаментальных и прикладных исследований «Комплект приборов для экологического мониторинга и нефтегазового комплекса» при поддержке Департамента образования и молодежной политики (приказ от 25.08.2017 № 1281) Ханты-Мансийского автономного округа – Югры и Сургутского государственного университета.

Литература

1. Бердников В. С., Гришков В. А., Марков В. А., Пшеничников Ю. М. Тепловая гравитационно-капиллярная конвекция в подогреваемых снизу горизонтальных слоях жидкости // Сб. тр. XXVII Сибирского теплофизического семинара. Новосибирск : Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2004. С. 1–19.
2. Ганиев М. И., Дёмко А. И., Семенов О. Ю. Исследование распределения концентрации газа в трубах в сборнике // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство : сб. науч. ст. по итогам 4-й Междунар. науч. конф. Казань, 2019. С. 214–218.
3. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ : справ. Кн. 2 / под общ. ред. Е. А. Шорникова ; 5-е изд., перераб. и доп. СПб. : Политехника, 2004. 412 с.
4. Semenov O. Yu., Dyomko A. I. Liquid and Gas Optical Flowmeter Model Development // AIP Conference Proceedings 2141, 050010. 2019. DOI 10.1063/1.5122153.
5. Liu C., Wang Ya., Li Y., Xu M. Experimental Study On New Leak Location Methods for Natural Gas Pipelines Based on Dynamic Pressure Waves // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018. No. 54. P. 83–91. DOI 10.1016/j.jngse.2018.03.023.
6. Tu C., Zhang J. Nanoparticle-laden Gas Flow Around a Circular Cylinder at High Reynolds Number // Int J Num Methods Heat Fluid Flow. 2014. No. 24. P. 1782–1794.
7. Семенов О. Ю., Дёмко А. И. Разработка модели оптического расходомера жидкости и газа // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 9-й междунар. науч.-технич. конф. (Омск, 26 февраля – 28 февраля 2019 г.). Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. С. 207–208.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: гидродинамика. Т. 6 ; изд. 6-е, испр. 2017. 736 с.
9. Cengel D., Yunus A., Michael A. Boles. Thermodynamics: An Engineering Approach 8th Edition. McGraw-Hill Education, 2014. 1024 p.
10. Попов И. А. Гидродинамика и теплообмен внешних и внутренних свободноконвективных вертикальных течений с интенсификацией. Интенсификация теплообмена : моногр. ; под общ. ред. Ю. Ф. Гортышова. Казань : Центр инновационных технологий, 2007. 326 с.
11. Guiatni M., Benallegue A., Kheddar A. Thermal Display for Telepresence Based on Neural Identification and Heat Flux Control // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. MIT Press, 2009. No. 18 (2). P. 156–169.

12. Бегак О. Ю., Конопелько Л. А., Окрепилов М. В. Экологические проблемы нефтедобычи // Экологические системы и приборы. 2012. № 2. С. 32–36.
13. Papadopoulos P. K., Vouros A. P. Pulsating Turbulent Pipe Flow in the Current Dominated Regime at High and Very-High Frequencies // Int J Heat Fluid Flow. Vol. 58. 2016. P. 54–67.
14. Дмитриев В. Г., Тарасов Л. В. Прикладная нелинейная оптика. М. : Наука, 2006. 352 с.
15. Рахимов Н. Р. Оптический контроль в нефтеперерабатывающем производстве : моногр. Фергана : Техника, 2004. 91 с.
16. Wang M., Zeng J. Convective Heat Transfer of the Different Texture on the Circumferential Surface of Coupling Movement (Rotating Speed Coupling with Air Velocity) Disk // Int Conf on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE). 22–24 Lushan, China, 2011. P. 1128–1132.
17. Березовский Е. В., Акчурин А. Д. Исследование влияния газа, содержащегося в нефти на показания преобразователей объемного расхода нефти // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2011. № 4. С. 43–45.
18. Дёмко А. И., Семенов О. Ю., Дёмко И. А. Плотномер. Пат. 2018140979 Рос. Федерация, RU 191611 U1 МПК G01N 9/12 (2006.01) СПК G01N 9/12 (2019.02) G01F 23/62 (2019.02). Патентообладатель БУ ВО «Сургутский государственный университет». № 2018140979; заявл. 21.11.2018; опублик. 14.08.2019. Бюл. № 23. 8 с.
19. Bannwart A. C., Rodriguez O. M. H., Trevisan F. E., Vieira F. F. Experimental Investigation on Liquid – Liquid – Gas Flow: Flow Patterns and Pressure-Gradient // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2009. A. 65. P. 1–13.
20. Castillo E. E., Napenciuc C. L., Borca-Tasciuc T. Thermoelectric Characterization by Transient Harman Method under Nonideal Contact and Boundary Conditions // Rev Sc Instrum. 2010. Vol. 81. P. 1–10.
21. Тоски Э., Ханссен Б. В., Смит Д., Теувени Б. Эволюция измерений многофазных потоков и их влияние на управление эксплуатацией // Нефтегазовое обозрение. 2003. С. 69–77.
22. Damean N., Regtien P. P. L. Poiseuille Number for the Fully Developed Laminar Flow Through Hexagonal Ducts Etched in (100) Silicon // Sens Actuators. 2001. A. 90. P. 96–101.
23. Goupil C. Continuum Theory of Thermoelectric Elements. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, Germany, 2016. 363 p.
24. Вакулин А. А., Аксенов Б. Г., Тамосов А. В., Вакулин А. А. Измерение расхода многофазного потока дисперсной структуры // Вестник ТюмГУ. 2012. № 4. С. 42–46.
25. Goldsmid H. J. Introduction to Thermoelectricity. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2010. 250 p.