

сырой нефти без учета воды с помощью ИУ дебитов нефтяных скважин.

В заключение можно привести следующие рекомендации:

увеличить допускаемые пределы относительной погрешности измерения массы нетто сырой нефти по [1] в диапазонах объемного содержания воды в сырой нефти от 1 до 5 % и от 5 до 10 %;

перейти от ступенчатого задания относительной погрешности определения массы нетто сырой нефти по [1] к табличному или графическому в виде полиномиальной кривой;

перейти от ступенчатого задания абсолютной погрешности определения содержания воды в сырой нефти для точных влагомеров к мелко-линейному, т. е. заданию в виде суммы трех составляющих — аддитивной, мультипликативной и нелинейной;

обеспечить возможность поверки ИУ на месте эксплуатации путем создания эталонных ИУ;

внести предложение о разработке, аттестации и включении в [1] МИ массы сырой нефти с использованием ИУ применительно к конкретным условиям их эксплуатации, как это сделано для СИКНС.

Выводы. Только влагомер Phase Dynamics сер. F удовлетворяет требованиям [1] по погрешности измерения мас-

сы нетто при объемной доле воды 0 — 85 %. Предложенные выше рекомендации позволят оптимизировать процессы:

выбора влагомеров сырой нефти;
проведения метрологической экспертизы проектов СИКНС и ИУ, а также разработки и внедрения новых СИ;
разработки и модернизации влагомеров сырой нефти;
повышения доверия к результатам измерений массы нетто сырой нефти с применением СИКНС и ИУ.

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ Р 8.615—2005.** ГСИ. Измерения количества извлекаемой из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования.

2. **ГОСТ 2477—65.** Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды.

3. **Цыбульский О. А.** Погрешность широкодиапазонных измерений. // Законодательная и прикладная метрология. 2010. № 4. С. 5—10;

4. **Немиров М. С., Силкина Т. Г., Ибрагимов Р. Р.** Измерение содержания воды в нефти в лабораториях нефтяной промышленности // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2011. № 4. С. 39—40.

Дата принятия 15.03.2012 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

53.082.6

Применение теории решений задач Штурма—Лиувилля при разработке методов измерения теплофизических характеристик

П. В. БАЛАБАНОВ

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия,
e-mail: pav-balabanov@yandex.ru

В общем виде поставлена краевая задача теплопроводности для многослойных систем, на внешние поверхности которых действуют граничные условия третьего рода. Приведено решение поставленной задачи на стадии регулярного теплового режима первого рода. Показан общий подход применения теории решений задач Штурма—Лиувилля для многослойных систем при разработке методов измерения теплофизических характеристик.

Ключевые слова: задача Штурма—Лиувилля, теплофизические характеристики.

The boundary-value problem of heat conductivity for multilayer systems (planar, cylindrical and spherical shape) with external surface affected by the boundary conditions of the third kind is set in general form. The solution of problem at the stage of regular thermal regime of the first kind is presented. The general approach of Sturm—Liouville problems decision theory application for multilayer systems at developing the methods of thermophysical properties measurement is shown.

Key words: Sturm—Liouville problem, thermophysical properties.

Регенеративные продукты и химические поглотители (хемосорбенты) на основе супероксидов и гидроксидов щелочных и щелочноземельных металлов Na, K, Ca, Li в виде многоканальных блоков, пластин, таблеток, зерен широко применяют для регенерации воздуха в замкнутых объемах. При

построении алгоритмов систем автоматизированного управления, написании технических заданий, разработке эксплуатационной документации на установки регенерации требуется знание теплофизических характеристик (ТФХ) хемосорбентов. Для измерения ТФХ широкого ассортимента регене-

ративных продуктов и поглотителей разработаны и апробированы методы [1—4], в основу математического обеспечения которых положена теория решений задач Штурма—Лиувилля.

В рамках данной работы представлен общий подход (принцип) использования теории решений задач Штурма—Лиувилля для создания ряда методов измерений ТФХ хемосорбентов различных геометрии и химического состава.

Все регенеративные продукты и поглотители обладают высокой химической активностью, поэтому в конструкциях измерительных ячеек для предотвращения непосредственного контакта изучаемого материала с окружающей средой и отдельными конструктивными элементами применяют специальные защитные оболочки из коррозионно-стойких материалов. Исследуемым образцам придают форму неограниченной пластины (при измерении ТФХ хемосорбентов на матрице) или тонких блоков круглого сечения, неограниченного цилиндра или шара (для насыпных слоев зеренных хемосорбентов). Таким образом, физическую модель измерительной ячейки можно представить в виде многослойной системы, состоящей из n слоев плоской, цилиндрической или сферической формы (рис. 1). Один из слоев представляет собой образец исследуемого материала, остальные слои изготавливают из материалов с известными ТФХ.

Упрощенные варианты конструкций измерительных ячеек, используемых для реализации методов измерения ТФХ хемосорбентов, представлены на рис. 2. В случае плоской ячейки (см. рис. 2, а) два идентичных плоских изучаемых образца 3 приводят в тепловой контакт по плоскости с пластинами 5, 6, выполненными из полиметилметакрилата и металла, соответственно. Между пластинами 6 размещены плоский термометр сопротивления 4 и нагреватель, изготовленные из медной и манганиновой проволоки. Их электрические провода выводятся наружу через трубку-разъем 7. Детали 1, 2 выполнены из теплоизоляционного материала и являются элементами конструкции измерительной ячейки. Из зеренных хемосорбентов формируют насыпные слои цилиндрической или сферической формы. Для измерения ТФХ насыпных слоев цилиндрической формы используют ячейку (см. рис. 2, б), в которой исследуемый материал помещают в пространство 12, образованное трубкой 11 и ограничительными сетками 9. На центральной оси трубки размещают горячий спай термопары 10, холодные концы которой выводят наружу через трубки 13. Трубка 11 с торцов герметично закрыта крышками 8. Чтобы измерять ТФХ насыпного слоя шаровой формы (см. рис. 2, в), материал располагают в пространстве 15, образованном сферической оболочкой 14 и крышкой 16. Измерение температуры осуществляют при помощи термопары 17. Для вывода проводов термопары и крепления измерительной ячейки используют втулку 18.

С целью измерений комплекса ТФХ (теплопроводности, температуропроводности, объемной теплоемкости) применяют две группы методов. Сущность методов первой группы [3, 4] (методов двух альф) состоит в том, что проводят два эксперимента, в ходе которых образцы (или насыпной слой) исследуемого материала охлаждают в среде с постоянной температурой при интенсивности теплообмена, характеризующейся коэффициентом теплоотдачи $\alpha_1 = \text{const}$ в первом опыте и $\alpha_2 = \text{const}$ — во втором. Определив по экспериментальным данным темп охлаждения образцов на стадии регулярного теплового режима первого рода, вычисляют теплопроводность и температуропроводность материала. Для изме-

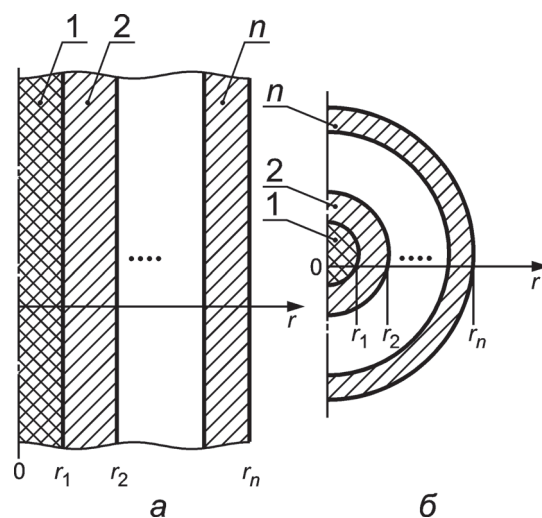


Рис. 1. Многослойная физическая модель измерительной ячейки плоской (а) и цилиндрической или сферической (б) формы

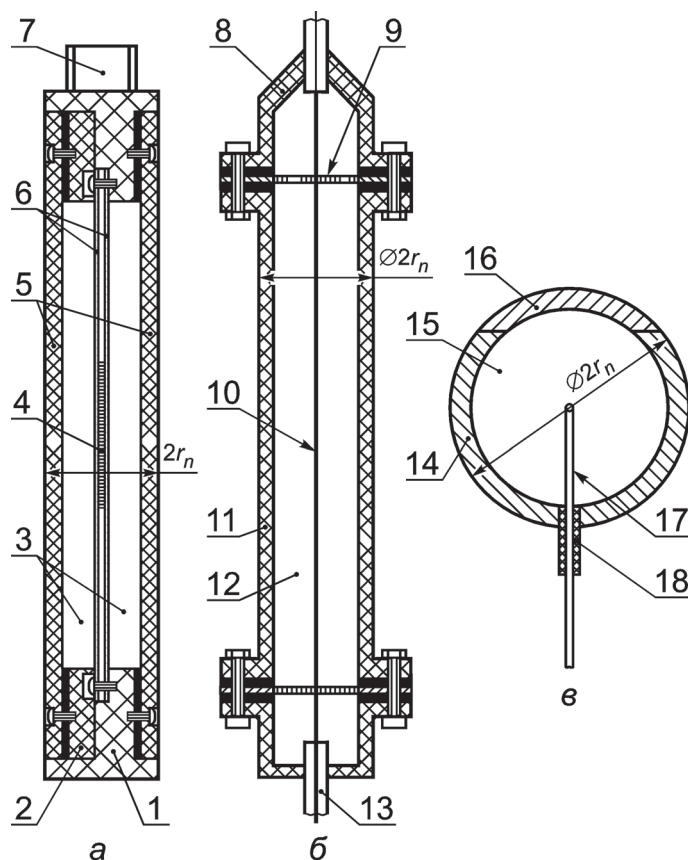


Рис. 2. Схемы конструкций плоской (а), цилиндрической (б) и сферической (в) измерительных ячеек:

1, 2 — конструктивные элементы ячейки; 3 — два идентичных образца; 4 — термометр сопротивления; 5, 6 — пластины, соответственно, из полиметилметакрилата и металла; 7 — трубка-разъем; 8 — крышки, закрывающие трубку 11; 9 — ограничительная сетка; 10 — горячий спай термопары; 12, 15 — пространства для размещения материала; 13 — трубки; 14 — сферическая оболочка; 16 — крышка; 17 — термопара; 18 — втулка

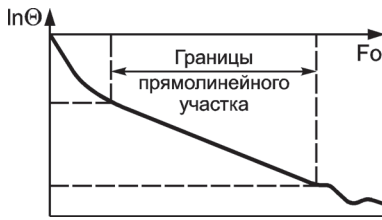


Рис. 3. График зависимости $\ln \Theta(0, Fo)$ от числа $(0, Fo)$

рения α_1, α_2 используют эталонную ячейку, изготовленную из материала, с известными теплопроводностью λ_3 и температуропроводностью a_3 . При этом, чтобы условия теплообмена на внешних поверхностях измерительной и эталонной ячеек можно было считать одинаковыми, их геометрические размеры должны совпадать, а ТФХ внешней оболочки измерительной ячейки λ_n, a_n не должны сильно отличаться от аналогичных характеристик эталонной ячейки. Методы второй группы (комплексные методы, сочетающие стационарную стадию теплопереноса и стадию регулярного режима первого рода) состоят из двух этапов эксперимента [1, 2]. На первом этапе в стационарной стадии теплопереноса определяют теплопроводность, а на втором — в стадии регулярного режима первого рода определяют температуропроводность.

Порядок проведения измерительных операций в методах двух альф.

1. В зависимости от вида (блоки, пластины, гранулы и т. д.) и фракционного состава (при измерении зеренных хемосорбентов) регенеративного продукта или поглотителя выбирают измерительную ячейку и заполняют ее исследуемым материалом.

2. Измерительную и эталонную ячейки термостатируют при температуре T_0 .

3. В момент начала активной стадии эксперимента обе ячейки помещают в термостат при температуре T_c и постоянном коэффициенте теплоотдачи α_1 .

4. В моменты времени τ регистрируют температуры $T(r=0, \tau), T_3(r=0, \tau)$ в центрах измерительной и эталонной ячеек. Вычисляют числа Фурье $Fo = a_n \tau / r_n^2, Fo_3 = a_3 \tau / r_n^2$. Контролируют безразмерную температуру $\Theta(0, Fo) = (T(0, \tau) - T_0) / (T_0 - T_c)$ в центре измерительной ячейки.

5. Активную стадию эксперимента завершают при условии $\Theta(0, Fo) \leq 0,1 \dots 0,15$.

6. Обработывают результаты эксперимента.

Обработка экспериментальных данных состоит в определении значения числа Био $Bi = \alpha_1 r_n / \lambda_n$ по измеренному в опыте с эталонной ячейкой коэффициенту теплоотдачи α_1 и первого собственного значения ε_1^2 задачи Штурма—Лиувилля:

$$\frac{d}{d\bar{r}} \left[\bar{r} \frac{d\psi_1(\bar{r})}{d\bar{r}} \right] + \frac{\varepsilon_1^2}{\beta(\bar{r})} \bar{r} \psi_1(\bar{r}) = 0; \quad (1)$$

$$\psi_1'(0) = 0; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_1(r_i/r_n - 0) &= \psi_1(r_i/r_n + 0); \\ \lambda_i \left(\frac{d\psi_1(r_i/r_n - 0)}{d\bar{r}} \right) &= \lambda_{i+1} \left(\frac{d\psi_1(r_i/r_n + 0)}{d\bar{r}} \right); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$i = 1, n-1;$

$$\psi_1'(1) + Bi\psi_1(1) = 0 \quad (4)$$

как тангенса угла наклона прямолинейного участка графика зависимости $\ln \Theta(0, Fo) = f(Fo)$ (рис. 3).

Задача (1)—(4) соответствует краевой задаче теплопроводности в многослойной системе плоской ($r = 0$), цилиндрической ($r = 1$) или сферической ($r = 2$) формы при задании на поверхности ее внешнего слоя граничных условий третьего рода

$$\frac{\partial \Theta(\bar{r}, Fo)}{\partial Fo} = \beta(\bar{r}) \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left[\bar{r} \frac{\partial \Theta(\bar{r}, Fo)}{\partial \bar{r}} \right]; \quad 0 \leq \bar{r} \leq 1, \quad Fo > 0; \quad (5)$$

$$\Theta(\bar{r}, 0) = 1; \quad (6)$$

$$\partial \Theta(0, Fo) / \partial \bar{r} = 0; \quad (7)$$

$$\Theta(r_i/r_n - 0, Fo) = \Theta(r_i/r_n + 0, Fo);$$

$$\left. \lambda_i \left(\frac{\partial \Theta(r_i/r_n - 0, Fo)}{\partial \bar{r}} \right) = \lambda_{i+1} \left(\frac{\partial \Theta(r_i/r_n + 0, Fo)}{\partial \bar{r}} \right); \right\} \quad (8)$$

$i = 1, n-1;$

$$\partial \Theta(1, Fo) / \partial \bar{r} + Bi\Theta(1, Fo) = 0. \quad (9)$$

Здесь $\bar{r} = r/r_n$ — безразмерная пространственная координата; λ_i, a_i — теплопроводность и температуропроводность i -го слоя системы; $\beta(\bar{r})$ — безразмерная температуропроводность,

$$\beta(\bar{r}) = \begin{cases} a_1/a_n, & 0 < \bar{r} < r_1/r_n; \\ \dots & \\ 1, & r_{n-1}/r_n < \bar{r} < 1. \end{cases}$$

Краевая задача теплопроводности (5)—(9) записана с учетом следующих допущений: температурное поле в каждом из слоев одномерное, термические сопротивления на поверхностях контакта слоев и теплоперенос излучением в материалах слоев отсутствуют, ТФХ материалов слоев постоянные и не зависят от изменения температуры в ходе эксперимента.

Решение краевой задачи (5)—(9), полученное методом разделения переменных, на стадии регулярного режима первого рода имеет вид

$$\Theta(\bar{r}, Fo) \approx A_1 \exp(-\varepsilon_1^2 Fo) \psi_1(\bar{r}), \quad (10)$$

где A_n — коэффициенты разложения начального условия (6) в ряд Фурье по собственным функциям; $\psi_1(\bar{r})$ — первая собственная функция задачи Штурма—Лиувилля (1)—(4).

Как следует из (10), ε_1^2 имеет смысл тангенса угла наклона прямой $\ln \Theta(\bar{r}, Fo) \approx \ln A_1 \psi_1(\bar{r}) - \varepsilon_1^2 Fo$, где $\ln A_1 \psi_1(\bar{r}) = \text{const}$.

Для вычисления коэффициента теплоотдачи используют формулу

$$\alpha_1 = Bi_3 \lambda_3 / r_n,$$

число Bi_3 определяют из решения задачи Штурма—Лиувилля

$$\frac{d}{dr} \left[r^r \frac{\partial \psi_{31}(\bar{r})}{\partial \bar{r}} \right] + \varepsilon_{31}^2 r^r \psi_{31}(\bar{r}) = 0;$$

$$\psi'_{31}(0) = 0; \psi'_{31}(1) + Bi_3 \psi_{31}(1) = 0,$$

соответствующей краевой задаче теплопроводности в неограниченной пластине ($r = 0$), цилиндре ($r = 1$) или шаре ($r = 2$), причем ε_{31}^2 находят с учетом экспериментальных данных для эталонной ячейки как тангенс угла наклона прямолинейного участка зависимости $\ln \frac{T_3(0, \tau) - T_c}{T_0 - T_c} = f(Fo_3)$.

Таким образом, при обработке экспериментальных результатов первого опыта получают пару значений Bi , ε_1^2 , которые являются параметрами задачи (1)—(4).

7. После завершения первого эксперимента проводят второй, повторяя последовательность измерительных операций 1—6, но уже при другом постоянном значении коэффициента теплоотдачи α_2 . В результате обработки экспериментальных данных второго эксперимента определяют вторую пару значений, Bi , ε_1^2 .

8. Теплопроводность λ_i и температуропроводность a_i i -го слоя исследуемого материала определяют численно из решения системы двух задач Штурма—Лиувилля (1)—(4), подставляя в первую задачу значения пары Bi , ε_1^2 , найденные в первом эксперименте, а во вторую задачу — ту же пару, значения которой получены во втором эксперименте.

С целью повышения точности определения искомых ТФХ оба эксперимента рекомендуется проводить при числах Био, максимально отличающихся друг от друга [4]. Первый эксперимент проводят при интенсивности теплообмена, характеризующей условием $Bi \rightarrow \infty$ (на практике при $Bi > 100$). Выполнение этого условия позволяет свести граничное условие (4) к виду $\psi_1(1) = 0$ и означает постоянство температуры внешней поверхности многослойной системы. Термостатирование внешних поверхностей измерительных ячеек осуществляется, например, за счет жидкости, интенсивно омывающей термостатируемую поверхность, или при использовании специальных теплообменников, как в конструкции плоской ячейки [1]. Второй эксперимент осуществляют в воздушном термостате без обдува измерительной ячейки при $Bi \approx 0,5 \dots 1,5$.

Порядок осуществления измерительных операций комплексным методом рассмотрим на примере измерения ТФХ плоских образцов хемосорбента.

1. Исследуемые образцы в форме плоских многоканальных блоков или пластин помещают в плоскую измерительную ячейку (см. рис. 2, а).

2. Внешние поверхности ячейки термостатируют при температуре T_0 , для чего их приводят в тепловой контакт по плоскости с теплообменниками (рис. 4). Теплообменник представляет собой проточную камеру, образованную цилиндрическим отрезком трубы 1, с двух сторон закрытой крышками 4, причем одна из крышек постоянно омывается потоком теплоносителя, который непрерывно под давлением подводится через отверстие 3 в штуцере 2 и отводится самотеком через штуцер 5.

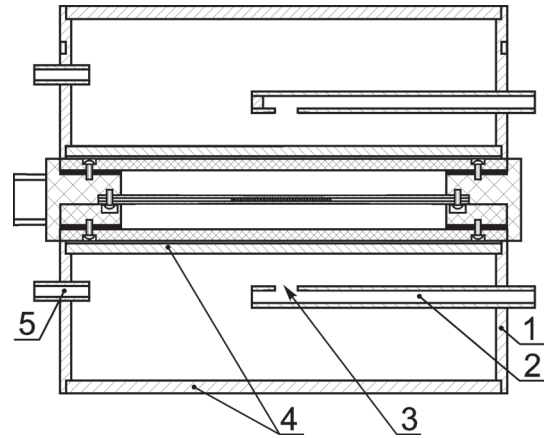


Рис. 4. Конструкция плоской измерительной ячейки с теплообменниками для измерений ТФХ комплексным методом:

1, 4 — труба и закрывающие ее крышки; 2, 5 — штуцеры; 3 — отверстие

3. На первом этапе эксперимента непрерывно подводят постоянное напряжение к нагревателю измерительной ячейки (см. рис. 2, а), контролируют температуру в ее центре и при наступлении стационарного теплового состояния регистрируют разность температур T_∞ , измеренной в центре, и температуры термостатирования T_0 .

4. После достижения стационарного состояния начинают второй этап. Прекращают подвод мощности к нагревателю и в моменты времени τ регистрируют температуры $T(0, \tau)$ в центре измерительной ячейки. Вычисляют числа Фурье

$Fo = a_n \tau / r_n^2$. Контролируют безразмерную температуру $\Theta(0, Fo) = (T(0, \tau) - T_0) / (T_\infty - T_0)$.

5. Завершают второй этап эксперимента при условии $\Theta(0, Fo) \leq 0,1 \dots 0,15$.

6. Обработывают результаты эксперимента.

По данным, полученным на первом этапе, вычисляют теплопроводность исследуемого материала как функцию измеренной разности температур $\lambda_2 = f(T_\infty - T_0)$ (формула для вычисления теплопроводности, полученная из решения соответствующей стационарной задачи теплопроводности, приведена в [1]).

С использованием результатов, полученных на втором этапе, определяют первое собственное значение ε_1^2 задачи Штурма—Лиувилля (1)—(4), записанной при $r = 0$ и граничном условии (4) вида $\psi_1(1) = 0$. Напомним, что ε_1^2 имеет смысл тангенса угла наклона прямолинейного участка графика зависимости $\ln \Theta(0, Fo) = f(Fo)$ (см. рис. 3). Искомую температуропроводность определяют из численного решения задачи (1)—(4) при известных значениях ε_1^2 и теплопроводности исследуемого материала λ_2 .

Таким образом, ТФХ исследуемых материалов находят из решений задач Штурма—Лиувилля, которые соответствуют крайним задачам теплопроводности в многослойных системах плоской, цилиндрической и сферической форм с начальным равномерным распределением температуры и заданными на внешних поверхностях граничными условиями первого или третьего рода. Представленный выше способ применения теории решений задач Штурма—Лиувилля по-

ложен в основу новых методов измерения ТФХ регенеративных продуктов и химических поглотителей с различными геометрической формой, размерами и химическим составом. Разработанные методы характеризуются простотой технической реализации и достаточной для практики точностью (погрешности измерения составляют 7—10 % [2, 3]), что позволяет использовать их при лабораторных исследованиях теплофизических характеристик хемосорбентов.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 — 2013 годы» (государственный контракт № 14.740.11.0141).

Л и т е р а т у р а

1. Пономарев С.В. и др. Метод и устройство для измерения теплофизических характеристик регенеративных продуктов // Измерительная техника. 2003. № 9. С. 51—54; Ponomarev S. V. et al. Method and device for measuring the thermophysical characteristics of regenerative products // Measurement Techniques. 2003. V. 46. N 9. P. 888—892.

2. Пономарев С. В., Балабанов П. В. Математическая обработка результатов при измерении теплопроводности и температуропроводности методом, аналогичным регулярному режиму первого рода // Вестник Тамбовского гос. техн. ун-та. 2003. Т. 9. № 3. С. 382—390.

3. Балабанов П. В., Пономарев С. В. Применение теории метода двух альф для исследования теплофизических характеристик регенеративных продуктов и химических поглотителей // Измерительная техника. 2010. № 11. С. 45—49; Balabanov P. V., Ponomarev S. V. The use of the theory of the two-alpha method to investigate the thermophysical characteristics of regenerative products and chemical absorbents // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N 11. P. 1256—1263.

4. Балабанов П. В., Пономарев С. В. Повышение точности метода двух альф при измерении теплофизических характеристик // Измерительная техника. 2011. № 2. С. 57—60; Balabanov P. V., Ponomarev S. V. Increasing the accuracy of the two-alpha method when measuring thermal characteristics // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 2. P. 194—199.

Дата принятия 28.11.2011 г.

536.2

Термодинамическое приложение метода электростатической левитации

А. В. КОСТАНОВСКИЙ, М. Е. КОСТАНОВСКАЯ

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия,
e-mail: Kostanovskiy@gmail.com

Проведено исследование поведения производства энтропии и взаимосвязи силы с потоком для тепловой нестационарной задачи в отсутствие градиента температуры с использованием метода электростатической левитации. Обнаружено нарушение линейности зависимости силы и соответствующего ей потока при сохранении билинейной зависимости плотности производства энтропии от силы и потока. Найдены условия, при которых линейность сохраняется.

Ключевые слова: неравновесная термодинамика, температура, сила, поток, плотность производства энтропии, молибден.

The study of behavior of entropy generation and the force/flow interrelations for thermal non-stationary problem at absence of a gradient of temperature is carried out. The breach of linearity of dependence between the force and corresponding flow at preservation of bilinear dependence of entropy generation rate from force and flow is revealed. The conditions at which this linearity is retained are found.

Key words: nonequilibrium thermodynamic, temperature, force, flow, entropy generation rate, molybdenum.

Линейный режим неравновесной термодинамики для тепловых задач иллюстрируют, как правило, на примере системы, в которой при стационарных условиях наблюдается градиент температуры $\text{grad} T$ [1, 2]. Для этой задачи сила $F = \text{grad}(1/T)$, поток $J = -\lambda \text{grad} T$ (закон Фурье при $\lambda = \text{const}$, где λ — теплопроводность) и производство энтропии $p = FJ$ (билинейная функция силы и потока) являются постоянными. Именно в таком случае в результате линейности зависимости силы от соответствующего ей потока $J_j = \sum_j L_j F$, L_j — коэффициент Онсагера, зависимость производства энтро-

пии от силы становится квадратичной. В настоящее время материалы и изделия все чаще эксплуатируют при динамических нагрузках, поэтому необходимо изучать свойства веществ и материалов в нестационарном тепловом режиме. Фундаментальный интерес представляет исследование взаимосвязи силы и потока и поведения производства энтропии в нестационарных условиях. Идеальным инструментом для этого являются методы электростатической левитации (ЭЛ) [3—7] и электростатической аэродинамической левитации (ЭАЛ) [8]. Ранее указанные методы использовали исключительно при изучении теплофизических свойств твердой фазы и переохлажденной жидкости. Однако, как показано далее,