

УДК 532.1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИССЛЕДУЕМОЙ СРЕДЫ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

© 2011 С.Н. Редников, Н.Н. Муромцев

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск

Поступила в редакцию 25.02.2011

В статье рассматриваются проблемы измерения вязкости и температуры углеводородов при давлениях свыше 150 МПа.

Ключевые слова: *давление, вязкость, температура, углеводороды*

Определение вязкости при высоких давлениях имеет не только большое теоретическое значение, но и практическое применение, которое было рассмотрено в [1]. Исследование вязкости жидкости при высоких и сверхвысоких давлениях невозможно без учёта тепловых и химических процессов. Поэтому для точного определения вязкости жидкости необходимо знать ее температуру во время съема экспериментальных данных для внесения поправочных коэффициентов.

Методы измерения температуры исследуемого тела можно разделить на две группы. Первая группа – это измерение температуры стенок аппарата или окружающей его среды, так называемой термостатирующей среды; вторая – измерение температуры непосредственно внутри аппарата. Такие измерения проводят при помощи термопар, термометров сопротивления, оптическими, фотоэлектрическими пирометрами и т. д. Для исследований первоначально рассматривался метод измерения температуры при помощи термопары, как наиболее простой в техническом исполнении. Однако при детальном изучении теоретической основы данного метода был обнаружен факт, описанный в 1918 г. Перси Уильямсом Бриджманом. Его открытие заключалось в том, что высокое давление вызывает изменение термоэлектрической движущей силы термопары, что существенно влияет на ее показания. В ходе проведенных исследований П.У. Бриджман, Ф. Бонди и К. Свенсон вывели зависимость (рис. 1), по которым можно определять величину поправок, которые следует вводить в показания термопар. Однако даже если пользоваться этой поправкой, точность исследований

окажется очень низкой, так как выведенная ими экстраполяция поправки не учитывает тот факт, что «при различных температурах разные термоспай дают неодинаковые показания в одной и той же среде, причем разность показаний меняется с температурой» [2].

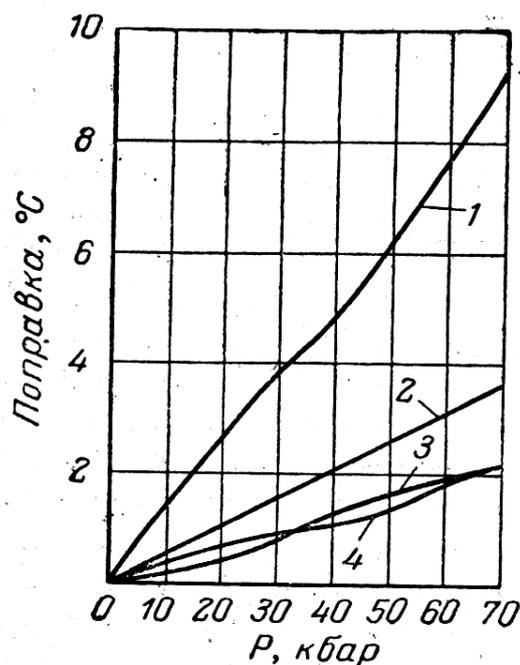


Рис. 1. Зависимость поправки к показаниям термопар от давления:

1 – платина-платинородиевая (10%), 2 – медь-константановая, 3 – никель-никельмолибденовая, 4 – хромель-алюминиевая

Попытки измерить температуру термисторами не дали положительных результатов вследствие нестабильности этих датчиков при высоком давлении. Ввиду всего выше изложенного, были рассмотрены иные методы измерения температуры при высоких давлениях: по тепловому шуму и по излучению.

Редников Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидравлика и гидропневмостемы». E-mail: srednikov@mail.ru  
Муромцев Николай Николаевич, магистр

Первый метод основан на том, что, если через сопротивление пропускать электрический ток, в нем возникнет тепловой шум, величина которого пропорциональна температуре. Исследования, проведенные Дж.В. Гаррисоном и А.В. Лаусоном в 1949 г., доказали, что при давлении до 10 000 атм. тепловой шум не зависит от давления. Следовательно, если установить зависимость э.д.с. теплового шума от температуры при атмосферном давлении, то остается только поместить электросопротивление в аппарат высокого давления и измерять температуру.

Второй метод – на том, что, практически любое вещество при нагревании начинает излучать в видимой и инфракрасной областях спектра. Данный метод основан на определении температуры вещества по инфракрасному излучению при помощи фотосопротивления. Сложность применения этого метода заключается в том, что для правильного измерения температуры под высоким давлением необходимо, чтобы между областью высокого давления и местом съема данных находилась прозрачная среда, плотность которой практически не зависела от изменения давления и температуры (например, световод из кварцевого полированного стержня).

Принимая все выше изложенное во внимание, был сделан вывод, что использование оптических пирометров при высоких давлениях затруднено. Помещение датчиков непосредственно в область высокого давления приведет к необходимости их тарировки, которая затруднена, а зачастую и невозможна вследствие изменения характеристик датчиков из-за высокого давления. В тоже время возможно определить температуру жидкости внутри вискозиметра, совершая измерение температуры внешней поверхности корпуса вискозиметра при помощи тепловизора и используя теорию начальной стадии процесса теплопроводности [3].

Предложенная методика основана на том, что мы имеем дело с процессом теплообмена при граничных условиях, характеризуемых постоянным коэффициентом теплоотдачи и изменяющейся с постоянной скоростью температурой среды, то есть с процессом нестационарной теплопроводности. Начальная стадия процесса охватывает малые промежутки времени, характеризуемые величинами критерия  $F_0 \leq 0,55$ . Следовательно, и эксперимент, основанный на теории начальной стадии теплопроводности, является также кратковременным, что является одним из основных преимуществ выбранного метода.

Процесс теплообмена в этих условиях описывается классическим дифференциальным уравнением теплопроводности:

$$c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

Сложность заключается в том, что температурные поля являются сложными функциями не только физических и геометрических свойств тела и граничных условий, но и начального теплового состояния тела, что приводит к сложным расчетным уравнениям для теплофизических свойств и сложной обработке опытных данных. Чтобы упростить решения этого уравнения принимаются следующие допущения: потери тепла с боковой части поверхности отсутствуют; распределение температуры по объему в начальный момент времени и в поперечном сечении для любого момента времени принимается равномерным, то есть при  $x \rightarrow \infty$  температура не изменяется со временем и тепловое сопротивление контакта отсутствует. Учитывая выше перечисленные допущения, решение дифференциального уравнения теплопроводности принимает вид:

$$t = A + B \cdot x + C \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot \tau}}} e^{-\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot \tau}}} d\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot \tau}}\right)$$

где  $A, B, C$  – константы интегрирования.

Постоянная интегрирования  $A$  определяется для условий  $x=0$  и для начального момента времени из уравнения:  $t|_{x=0}=A$ . При  $\tau=0$  уравнение теплопроводности принимает вид:

$$t = A + B \cdot x + C$$

Из него следует, что  $B=0$ , так как  $t_n = const$ , а  $C = t_n - t_{x=0}$ . В итоге получаем расчетные зависимости, выражающие изменение температуры во времени принимают вид:

$$t = t_{x=0} + (t_{n1} - t_{x=0}) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a_1 \cdot \tau}}\right)$$

$$t = t_{x=0} - (t_{n2} - t_{x=0}) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a_2 \cdot \tau}}\right)$$

Используя полученные выражения и зная коэффициент теплопроводности и начальную температуру поверхности, температуру на некотором удалении от поверхности, можем рассчитывать значение температуры самой жидкости в любой момент времени. Для

подтверждения адекватности разработанного метода измерения температуры был поставлен натурный эксперимент.

Во внутреннюю полость вискозиметра, установленного в вертикальном положении, была помещена откалиброванная термопара таким образом, чтобы она показывала температуру в зоне контакта рабочей жидкости и внутренней поверхности корпуса. Затем полость с помещенной в нее термопарой была

заполнена водой, температура которой составляла 100°C. После этого в течение последующих 15 минут с интервалом, равным одной минуте, делалась тепловизионная фотография внешней поверхности корпуса и проводилась запись показаний термопары. Используя тепловизионные фотографии, определим изменение температуры  $t$  на внешней поверхности корпуса вискозиметра с течением времени (рис. 2).

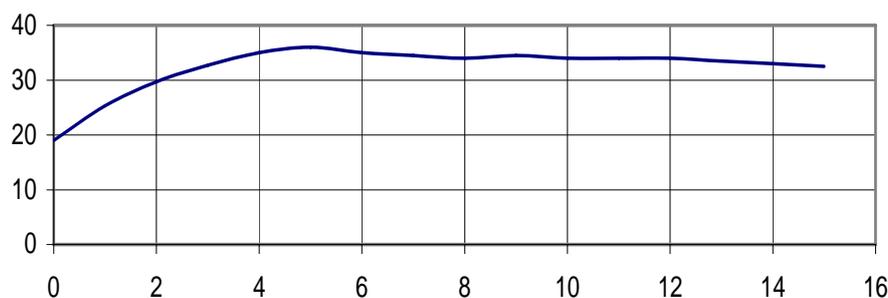


Рис. 2. Изменение температуры корпуса

Сопоставляем графики температур, определенных при помощи термопары непосредственно в зоне контакта жидкости с внутренней поверхностью, и температур, рассчитанных с использованием разработанной методики (рис. 3).

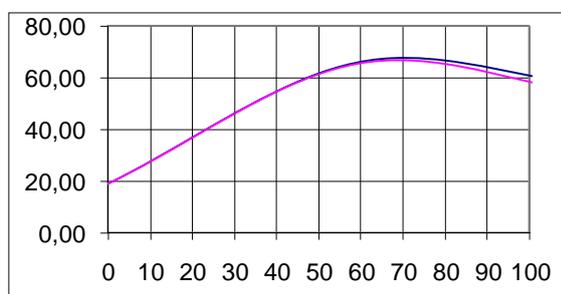


Рис. 3. Сопоставление графиков температур

Представленный график доказывает практически абсолютное соответствие этих температур, следовательно разработанный метод определения температур при помощи тепловизионного метода имеет право на существование и применение.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Редников, С.Н. Исследование вязкости углеводородов в области высоких давлений / С.Н. Редников, Н.Н. Муромцев // Материалы XLIX международной научно-технической конференции. Челябинск, 2010. С. 209-211.
2. Циклис, Д.С. Техника физико-химического эксперимента при высоких и сверхвысоких давлениях. — М., Химия, 1965. 414 с.
3. Осипова, В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. — М., Энергия, 1969. 392 с.

## TEMPERATURE DEFINITION OF THE INVESTIGATED ENVIRONMENT AT HIGH PRESSURES

© 2011 S.N. Rednikov, N.N. Muromtsev  
South Ural State University, Chelyabinsk

In article problems of measurement of viscosity and temperature of hydrocarbons at pressure from above 150 MPa are considered.

Key words: *pressure, viscosity, temperature, hydrocarbons*

Sergey Rednikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the "Hydraulics and Hydropneumatic Systems" Department. E-mail: srednikov@mail.ru  
Nikolay Muromtsev, Master