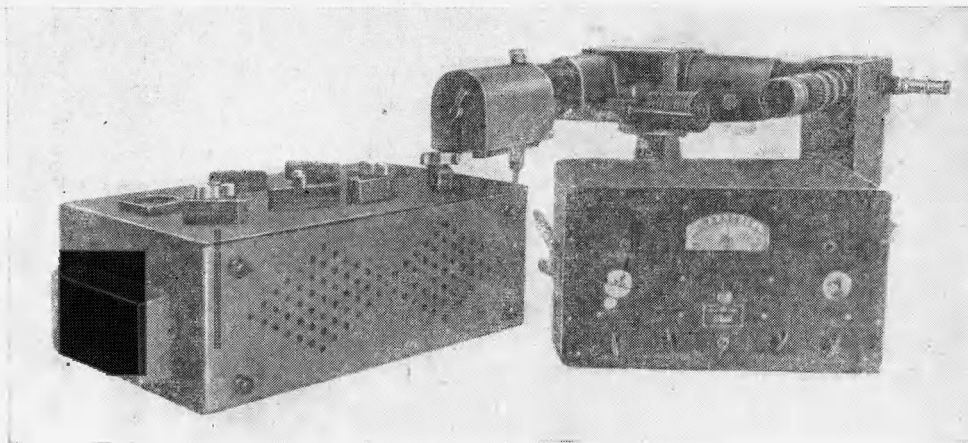


О РАСШИРЕНИИ И ШКАЛЫ ОБЪЕКТИВНОГО СПЕКТРОПИРОМЕТРА

Л. А. Боярский, Р. И. Ефремова (Новосибирск)

Применение нулевого модуляционного метода в области оптической пирометрии позволило создать ряд объективных (фотоэлектрических) приборов, работающих как в видимой [1-3], так и в инфракрасной [4] областях спектра. Эти приборы — объективные спектропирометры — выгодно отличаются от обычных визуальных пирометров с исчезающей нитью накала высокой точностью измерений, а также возможностью вести измерения при различных значениях эффективной длины волны.



Фиг. 1. Общий вид прибора

В частности, эталонные спектропирометрические установки типа СПК [1,2] позволяют производить сравнение температурных ламп, градуированных в шкалах яркостной или цветовой температур с погрешностью, не превышающей 0.05° в широком диапазоне температур и длин волн видимого спектра.

Однако установки типа СПК являются спектропирометрическими компараторами, лишь сличающими яркости. Кроме того, эти установки стационарны и громоздки. В силу этого применение СПК для измерения температуры в лабораторной практике представляется весьма проблематичным.

Образец лабораторного объективного спектропирометра СПП-58, описанный ранее [3], представляет собой переносный прибор¹, достаточно простой, надежный в обращении; он обладает высокой точностью и, главное, имеет шкалу яркостных (и цветowych) температур. Ниже приводятся дополнительные данные о градуировке и расширении шкалы температур пирометра СПП-58.

Объективный спектропирометр СПП-58 позволяет измерять монохроматические яркости различных объектов в интервале длин волн от 0.4 до 0.8 мк. Измерения производятся путем сравнения яркости объекта с яркостью образцовой лампы, встроенной в прибор.

Принцип действия прибора подобен принципу действия установок СПК [1,2] и заключается в следующем. Излучение исследуемого объекта и температурной лампы сравнения при помощи модулятора поочередно направляется через монохроматор на фотоумножитель. Если яркости объекта и лампы не равны, то ток фотоумножителя будет содержать переменную составляющую с частотой, равной частоте модуляции. Эта составляющая после усиления и синхронного детектирования попадает на стрелочный прибор со шкалой, имеющей нуль посередине. Отклонение стрелки прибора указывает на неравенство яркостей. Если же яркости равны, переменная составляющая отсутствует, и стрелка прибора остается на нуле шкалы.

Уравнивание яркостей производится изменением тока накала температурной лампы сравнения. Измерив при помощи образцовой катушки сопротивления и потенциометра этот ток, по градуировочной кривой находят яркостную температуру объекта, соответствующую значению эффективной длины волны, на которую настроен монохроматор.

Применение нулевого модуляционного метода позволило исключить погрешности, связанные с непостоянством чувствительности фотокатода, а также значительно уменьшить влияние флуктуаций фототока.

¹ Пирометр изготовлен Опытным заводом СО АН СССР по чертежам [3], любезно предоставленным Харьковским институтом мер и измерительных приборов.

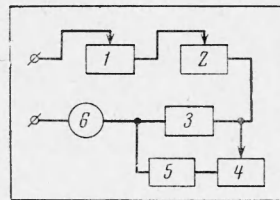
Спектропирометр СПП-58 конструктивно выполнен в виде трех блоков (фиг. 1). На станине первого блока укреплен универсальный монохроматор УМ-2, к коллиматорной трубе которого пристроен узел внешней оптической системы со шлейфовым модулятором [2,5] и лампой сравнения. К камерной трубе монохроматора прикреплена фотоэчейка. Станина блока имеет специальное гнездо для крепления стандартной оптической скамьи. На скамье при помощи специального держателя с юстировочным механизмом может закрепляться образцовая температурная лампа, по которой градуируется прибор.

Во втором блоке размещено электронное устройство с панелью управления прибором, в третьем — специальный реостат, служащий для регулировки тока лампы сравнения.

Приемником излучения служит фотоумножитель типа ФЭУ-27 с торцовым полупрозрачным висмута-серебряно-цезиевым катодом. Фотоумножители этого типа обладают высокой чувствительностью в широком диапазоне длин волн, что позволяет при работе в различных участках видимого спектра обходиться без замены фотоумножителя.

Оптическая и электронная схемы спектропирометра были описаны ранее [3].

Новый спектропирометр отличается от экспериментального образца лишь некоторыми конструктивными изменениями, сделавшими более удобными наладку прибора и работу на нем. Кроме того, в комплект нового прибора входит специальный реостат для регулировки тока лампы сравнения. На фиг. 2 представлена схема реостата, которая характеризуется следующими данными:



Фиг. 2. Схема реостата

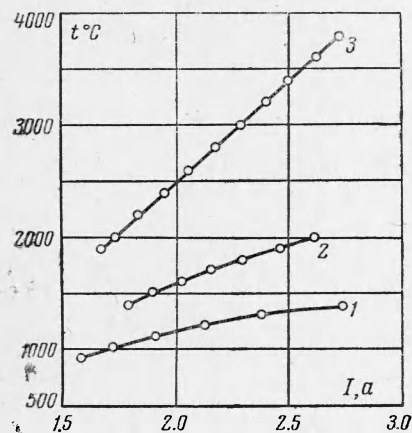
- 1—20×0.0065 ом; 2—21×0.00035 ом; 3—0.4 ом; 4—35 ом (реохорд)
- 5—23.3 ом; 6 — амперметр ПМ-70 от 0 до 5 а

Реостат содержит две декады с фиксированными ступенями регулирования и третью декаду — реохорд. Рукоятки первой и второй декад снабжены прижимными гайками, обеспечивающими малое и стабильное переходное сопротивление контактов. Рехорд зашунтирован малым сопротивлением 0.4 ом, поэтому вариация переходного сопротивления на его контактах не оказывает существенного влияния на стабильность тока через лампу.

Для того чтобы при вращении ручки реохорда полное сопротивление реостата изменялось, в первом приближении по линейному закону, реохорд намотан на клиновидный сердечник.

Минимальная ступень регулирования по сопротивлению не превышает $1.25 \cdot 10^{-4}$ ом. Полное сопротивление реостата изменяется от 0.4 до 1.7 ом. Реостат одновременно служит выключателем — первый контакт первой декады электрически изолирован.

Основная, первая шкала прибора охватывает интервал температур от 900 до 1400° С (кривая 1 на фиг. 3). Градуировка производится сличением яркости образцовой температурной лампы с яркостью лампы сравнения. Среднее значение силы тока, полученное после ряда сличений, считается соответствующим яркостной температуре лампы сравнения при данной длине волны (прибор градуировался при эффективной длине волны 0.65 мк).



Фиг. 3. Градуировочные кривые

Шкала спектропирометра была расширена при помощи стеклянных поглощающих фильтров, надеваемых на объектив внешней оптической системы, на основании известной формулы [6]

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = A \tag{1}$$

Здесь T_1 и T_2 — температуры в °К лампы сравнения и образцовой температурной лампы соответственно, A — пирометрическое ослабление поглотителя. Поглотитель следует изготовить из стекла, для которого величина A в первом приближении постоянна в диапазоне шкалы. Этому условию удовлетворяет стекло марки НС-13, из которого и были изготовлены поглотители для спектропирометра. Поглотитель толщиной 2.25 мм дает возможность измерять температуры от 1400 до 2000° С (кривая 2 на фиг. 3), а толщиной 3.9 мм — от 1900 до 3800° С (кривая 3 на фиг. 3). Температура нити накала лампы сравнения в обоих случаях изменяется в пределах от 1000 до 1400° С.

Образцовые температурные лампы, по которым градуировался спектропирометр, воспроизводили шкалу температур в пределах от 900 до 2000° С. Это дало возможность построить всю вторую шкалу пирометра от 1400 до 2000° С экспериментальным путем.

По данным градуировки было рассчитано среднее значение величины пирометрического ослабления поглотителя, оказавшееся равным $(165.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Пирометрическое ослабление второго поглотителя, при помощи которого прибор градуировался в пределах $1900\text{--}3800^\circ \text{C}$, определялось при температурах 1900 и 2000°C . Среднее значение $A = (346.5 \pm 0.65) \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Градуировка прибора строилась по формуле (1). Для заданных значений T_2 по известной величине A определялась температура T_1 лампы сравнения, а по градуировке первой шкалы — ток через лампу.

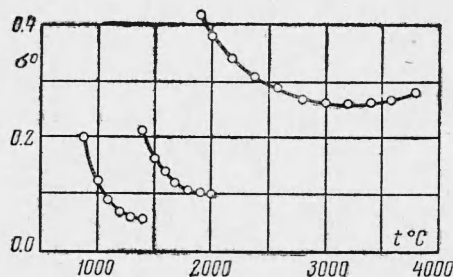
Градуировочные кривые были аппроксимированы квадратичными формами [7] и протабулированы: на первой и второй шкалах через 10° , на третьей шкале через 20° . Температуры, соответствующие промежуточным значениям силы тока, могут быть найдены линейным интерполированием.

Погрешности измерения температуры определяются как порогом чувствительности самого спектропирометра, так и погрешностями образцовых источников яркости, при помощи которых спектропирометр градуируется.

Порог чувствительности спектропирометра определяется как наименьшее обнаруживаемое изменение яркостной температуры. Эта величина есть не что иное, как среднее квадратичное отклонение единичных измерений от среднего. Экспериментально она находится следующим образом. В качестве объекта измерения используется температурная лампа, ток которой все время поддерживается постоянным. Ток температурной лампы сравнения регулируется до получения фотометрического равновесия и измеряется. Затем величина этого тока изменяется произвольным образом, снова регулируется и измеряется, и так много раз подряд. Среднее квадратичное отклонение σ полученного таким образом ряда измерений, выраженное в градусах, служит характеристикой порога чувствительности при данных значениях температуры и длины волны.

При измерениях с поглотителями величина σ_2 определяется согласно [6], как

$$\sigma_2 = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \sigma_1 \quad (2)$$



Фиг. 4. Среднеквадратичная погрешность измерения

Здесь величины T_1 и T_2 — те же, что и в формуле (1). Температурная зависимость среднеквадратичной погрешности измерений для всех трех шкал представлена на фиг. 4. Видно, что на первой шкале при температурах выше 1000°C погрешность не превосходит $0.05\text{--}0.1^\circ$; на второй шкале она лежит между 0.1 и 0.2° , а на третьей — между 0.25 и 0.4° . Таким образом, воспроизводимость измерений на спектропирометре СПП-58 почти не уступает воспроизводимости измерений на установке СПК.

Указанные выше величины и есть не что иное, как инструментальные погрешности прибора.

Спектропирометр градуировался по набору температурных ламп, аттестованному при помощи обычной визуальной техники как образцовый второго разряда. Для таких ламп погрешности градуировки [8] не должны превышать $\pm 1.5^\circ$ в интервале температур $900\text{--}1400^\circ \text{C}$ и $\pm 3^\circ$ в интервале $1400\text{--}2000^\circ \text{C}$. Очевидно, что при градуировке по набору ламп, аттестованному при помощи образцовых визуальных пирометров, нельзя полностью использовать высокую точность измерений спектропирометра СПП-58. Известно [9], что даже для самых лучших визуальных пирометров погрешность сличения яркостей при температуре 1063° (точка затвердевания золота) составляет 0.6° , т. е. существенно больше инструментальной погрешности СПП-58.

Возникает разрыв между точностью абсолютных измерений температуры, которая ограничена погрешностью градуировки температурных ламп при помощи визуального пирометра, и точностью относительных измерений (а также воспроизводимости результатов), которые ограничены значительно меньшими погрешностями, свойственными прибору СПП-58.

Положение изменится, когда метрологические учреждения будут аттестовать температурные лампы при помощи имеющихся в их распоряжении установок [1, 2] типа СПК.

Погрешность измерения в средней части первой шкалы ($1000\text{--}1300^\circ \text{C}$) может быть оценена по разности отсчетов, соответствующих температуре 1063°C , полученных экспериментально и при интерполяции градуировочной кривой (точка 1063°C при градуировке и построении интерполяционной формулы не учитывалась). Эта разность оказалась равной 0.45° .

Погрешность измерений на второй и третьей шкалах определяется главным образом возможной ошибкой в нахождении величины пирометрического ослабления A . Эта погрешность может быть получена дифференцированием формулы (1)

$$\delta T_2 = T_2^2 \delta A \quad (3)$$

Для второй шкалы при температуре 1700°C по формуле (3) получим величину ошибки 1.2° , а для третьей шкалы при 2700°C она достигнет 5.85° .

Таким образом, прибор обеспечивает высокую точность относительных измерений яркостной температуры. Точность же абсолютных измерений температуры значительно ниже и ограничена точностью образцовых температурных ламп.

Проградуировав прибор в лучах различной длины волны, можно вести измерения цветовой температуры методом сине-красного отношения [6]. Градуировка прибора может быть легко переведена в энергетические величины.

1. Спектропирометр СПП-58, в основных чертах повторяющий описанный ранее [3], был построен в заводских условиях.

2. Проведены исследование прибора, его градуировка и расширение шкалы до 3800°C . В широкой области температур инструментальная погрешность прибора не превышает 0.1° на первой шкале, 0.15° на второй шкале и 0.3° на третьей шкале. Гораздо большая величина погрешности абсолютного измерения температуры обусловлена погрешностью, возникающей при аттестации температурных ламп при помощи визуальных пирометров.

Контрольное определение погрешности изменения в «точке золота» подтвердило сделанные выводы: интерполированное значение золотой точки отклонилось от экспериментального на 0.45° .

Авторы благодарят П. Г. Стрелкова за интерес к работе и ряд советов, В. Е. Финкельштейна за дискуссию, а также Б. М. Озерова за помощь при измерениях.

Поступила 7 VII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. К а и д ы б а В. В., К о в а л е в с к и й В. А. Фотоэлектрический спектропирометр высокой точности. ДАН СССР, 1956, т. 108, стр. 633.
2. К о в а л е в с к и й В. А., Б о я р с к и й Л. А. Объективный спектропирометр СПК-2. Измерительная техника, 1958, № 6, стр. 57.
3. Б о я р с к и й Л. А., К о в а л е в с к и й В. А. Лабораторный объективный спектропирометр. Измерительная техника, 1960, № 1, стр. 31.
4. Ф и н к е л ь с т е й н В. Е., С т а р у н о в Н. Г. Объективный инфракрасный спектропирометр. Измерительная техника, 1960, № 1, стр. 28.
5. К о в а л е в с к и й В. А. О нулевом модуляционном методе при фотоэлектрических измерениях. ПТЭ, 1959, № 3, стр. 98.
6. Р и б о Г. Оптическая пирометрия. М., ГТТИ, 1934.
7. Я к о в л е в К. П. Математическая обработка результатов измерений. М., ГТТИ, 1953.
8. Приборы для измерения температуры и их поверка. М., Стандартгиз, 1957.
9. Ф и н к е л ь с т е й н В. Е., К а н д ы б а В. В. Новый метод градуировки пирометров и новый точный оптический пирометр. Тр. ВНИИМ им. Менделеева, 1958, вып. 36 (96), стр. 16.

О ПОЛНОТЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НЕФТИ ИЗ ДВУХСЛОЙНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД

В. Г. Оганджанияц, И. А. Сафаров (Москва)

Экспериментальными исследованиями [1,2] установлено, что в слоистых пористых системах, не изолированных между собой непроницаемыми перемычками, при определенных условиях вытеснения под действием капиллярных и гидродинамических сил происходит выравнивание поверхности водонефтяного контакта.

Показано также, что устойчивое равномерное продвижение фронта вытеснения имеет место не при каком-то одном фиксированном значении параметра, характеризующего отношения капиллярных и гидродинамических сил, а в некотором диапазоне значений этого параметра [3]. Ниже рассматриваются результаты дальнейших экспериментальных исследований механизма вытеснения нефти из двухслойных пористых сред.

Данные о моделях 1—5, на которых проведены обсуждаемые эксперименты, приведены в таблице, где l — длина модели в мм; H — общая высота модели в мм; h_1 и h_2 — соответственно высоты более проницаемого и менее проницаемого слоев в мм; k_1 и k_2 — проницаемости соответствующих слоев в *дарси*; m — средняя пористость, V_n — поровой объем или начальная нефтенасыщенность пористой среды в см^3 .

Модели, изготовленные из органического стекла, имели прямоугольные сечения. Пористой средой служил гидрофильный кварцевый песок заданного фракционного состава.

Вытесняемую жидкость имитировал неполярный керосин вязкостью $\mu_1 = 1.3—1.5 \text{ сП}$, плотностью $\rho = 0.786 \text{ г/см}^3$. В качестве вытесняющей жидкости была использована дистиллированная вода. Связанная вода не моделировалась.