

PACS: 82.80.Ej

Д.В. Варюхин, П.Н. Постол

ТЕРМОСТАТ ДЛЯ РАБОТЫ СКВАЖИННОГО ПРИБОРА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СКВАЖИНАХ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

Статья поступила в редакцию 16 октября 2017 года

Описаны устройство и принцип действия спроектированного термостата, обеспечивающего необходимые условия для работы скважинного прибора в течение времени обработки высокотемпературной скважины.

Ключевые слова: термостат, скважина, тепловая энергия, теплоприток, рабочее тело

Научно-исследовательские и поисково-разведывательные работы по выявлению и расширению минерально-сырьевой базы многочисленных месторождений разнообразных видов полезных ископаемых требуют сложных и дорогостоящих приборов. С их помощью можно изучать строение и состав недр земного шара, зондируя скважины. Но с ростом глубины скважины изменяются температура, давление и состояние внешней среды. Поэтому при эксплуатации скважинного прибора необходимо создать условия для его нормального функционирования, защитив от указанных внешних воздействий. С этой целью прибор помещают в термостат.

Термостат должен обеспечивать температуру скважинного прибора не более 85°C в течение 10 h. Отличительной особенностью работы термостата является то, что он должен компенсировать тепловую энергию, выделяемую скважинным прибором в процессе эксплуатации ($Q_{\text{inn}} = 60 \text{ W}$) и поступающую снаружи термостата – от стенки скважины, температура которой может достигать 140°C. Окружающей средой термостата является заполняющая скважину жидкость: нефть, вода, асфальтиты, парафины, механические примеси; содержание воды составляет от 5 до 95%. Эта среда является агрессивной для корпуса термостата и способна оказывать на него давление до 450 atm. Габариты термостата ограничены диаметром скважины 102 mm.

С учетом перечисленных условий и требований термостат должен изготавливаться из высокопрочного и коррозионно-стойкого материала – нержавеющей стали. Согласно исходным данным габариты скважинного прибора: диаметр 52 mm, длина 4715 mm. Исходя из условий прочности, корпус термостата изготовлен из трубы диаметром 102 mm, длиной 5000 mm, с толщиной стенки 8 mm. Ввиду соизмеримых размеров диаметров скважины и кор-

пуса термостата тепловая энергия, поступающая от стенки скважины на корпус термостата, нагревает его практически до своей температуры (140°C). Учитывая это, скважинный прибор необходимо отделить от корпуса вакуумным пространством как самым лучшим теплоизолятором. Тогда максимальная тепловая энергия снаружи будет поступать на термостатирующее устройство за счет излучения. Полная тепловая энергия, поступающая снаружи, определяется по формуле

$$Q_{\text{ext}} = Q_{\text{rad}} + Q_{\text{br}} + Q_{\text{res.g}}, \quad (1)$$

где Q_{rad} – теплоприток от теплового излучения; Q_{br} – теплоприток по тепловым мостам (заливочные трубопроводы, элементы крепления); $Q_{\text{res.g}}$ – теплоприток по остаточным газам в вакуумной полости (при давлении $1-5 \cdot 10^{-4}$ Па практически отсутствует, и им можно пренебречь).

Теплоприток излучением рассчитывается в соответствии с законом Стефана–Больцмана:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon_{\text{red}} \sigma 10^{-8} (T_2^4 - T_1^4) S_1. \quad (2)$$

Здесь ε_{red} – приведенная степень черноты поверхностей, участвующих в теплообмене:

$$\varepsilon_{\text{red}} = \varepsilon_1 \varepsilon_2 / [\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2) S_1 \varepsilon_1 / S_2] \quad (3)$$

(где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – степени черноты соответственно облучаемой (термостатирующее устройство) и излучаемой (корпус термостата) поверхностей); $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-4} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ – постоянная Стефана; T_1, T_2 – температуры поверхностей, участвующих в теплообмене, К; S_1, S_2 – площади соответственно облучаемой и излучаемой поверхностей, m^2 .

Теплоприток по тепловым мостам рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{br}} = \lambda F (T_2 - T_1) / L, \quad (4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; F – площадь сечения теплопроводящего элемента, m^2 ; $T_2 - T_1$ – градиент температур теплопроводящего элемента, К; L – длина теплопроводящего элемента, м.

Задавая величины указанных параметров в соответствии с [1,2] и производя расчеты по формулам (1)–(4), получаем величину внешней тепловой нагрузки $Q_{\text{ext}} = 65 \text{ W}$. Суммарная тепловая нагрузка на термостат с учетом внутренних тепловыделений составит $Q_{\text{tot}} = Q_{\text{inn}} + Q_{\text{ext}} = 60 + 65 = 125 \text{ W}$. Тогда за один цикл (10 h) термостат должен выполнить работу по отводу тепловой энергии:

$$A = Q_{\text{tot}} t = 125 \text{ W} \cdot 10 \text{ h} = 4.5 \cdot 10^6 \text{ J}. \quad (5)$$

Работа термостата состоит в отводе тепловой энергии в предварительно охлажденное рабочее тело, – как правило, воду (в различных ее состояниях). Она обладает довольно высокой теплоемкостью и отличается небольшими объемными изменениями при переходе жидкость–лед. Воду предварительно

переводят в состояние льда и охлаждают до заданной температуры жидким азотом. В процессе теплообмена в термостате вода, нагреваясь, поглощает тепловую энергию, которая расходуется на нагрев льда до температуры плавления, на плавление льда и нагрев воды до допустимой температуры. Величина этой энергии определяется по формуле

$$E = C_p^{\text{ice}} m(t_1 - t_2) + \lambda_{\text{ice}} m + C_p^w m(t_3 - t_1), \quad (6)$$

где $C_p^{\text{ice}} = 2.1 \cdot 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ – удельная теплоемкость льда от -20 до -1°C [3]; m – масса воды, kg; $t_1 = 273 \text{ K}$ – температура таяния льда; t_2 – температура переохлажденного льда, принята $t = 253 \text{ K}$; $\lambda_{\text{ice}} = 3.3 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$ – удельная теплота плавления льда [4]; $C_p^w = 4.2 \cdot 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ – удельная теплоемкость воды [3]; $t_3 = 353 \text{ K}$ – допустимый нагрев воды в термостате (80°C).

Подставляя данные в выражение (6) и приравнявая его к выражению (5):

$$2.1 \cdot 10^3 m(273 - 253) + 330 \cdot 10^3 m + 4.2 \cdot 10^3 m(353 - 273) = 4.5 \cdot 10^6, \quad (7)$$

определяем необходимое количество (массу) воды. После вычислений получаем $m = 6.35 \text{ kg}$ воды или льда.

Удельный вес льда $\gamma = 0.9167 \text{ kg/dm}^3$ [4], тогда объем, занимаемый льдом, должен быть не менее

$$V = m/\gamma = 6.35/0.9167 = 6.927 \text{ dm}^3. \quad (8)$$

В корпусе термостата устанавливается сосуд кольцеобразной формы, охватывающий скважинный прибор, диаметром $d_{\text{dev}} = 52 \text{ mm}$. Тогда внутренние диаметры охватывающего сосуда можно принять соответственно $D_{\text{vess}} = 76 \text{ mm}$ и $d_{\text{vess}} = 57 \text{ mm}$. Высота сосуда должна соответствовать высоте скважинного прибора. Принимаем $H = 4800 \text{ mm}$. Внутренний объем сосуда определяем по формуле

$$V_{\text{vess}} = \pi(D_{\text{vess}}^2 - d_{\text{vess}}^2)H/4. \quad (9)$$

Подставляя принятые конструктивно значения размеров сосуда, вычисляем его объем: $V_{\text{vess}} = 9.5 \text{ dm}^3$. Внутренний объем сосуда полностью удовлетворяет условию по количеству заполнения рабочей жидкостью, так как $V_{\text{vess}} > V$.

Сосуд подвешен к верхнему фланцу на четырех трубах диаметром 8 mm с толщиной стенки 1 mm , две из которых служат горловинами для заливки воды, а две другие предназначены для ввода жидкого азота по теплопроводному змеевику. Змеевик выполнен так, что ближе ко дну количество витков возрастает. Такая конструкция позволяет вымораживать воду со дна кверху, и лед за счет увеличения объема при переходе жидкость–лед заполняет дополнительный объем сосуда, не повредив его.

Исходная температура прибора, а следовательно, и воды в сосуде 25°C (298 K). Учитывая это и используя выражение (6), определяем количество тепловой энергии, поглощаемой жидким азотом, E_{ads} при охлаждении и за-

мораживании воды массой $m = 7$ kg. Величина E_{ads} складывается из энергий на охлаждение воды от температуры 25°C до 0 , на переход воды в лед и на охлаждение льда до -20°C :

$$E_{\text{ads}} = C_p^w m(t_4 - t_1) + \lambda_{\text{ice}} m + C_p^{\text{ice}} m(t_1 - t_2) \quad (10)$$

и составляет $3.3 \cdot 10^6$ J.

Массу испарившегося жидкого азота при охлаждении и замораживании воды определяем из выражения

$$m_N = E_{\text{ads}}/r_N = 16.5 \text{ kg}, \quad (11)$$

где $r_N = 200129$ J/kg – скрытая теплота парообразования жидкого азота [5].

Термостат компенсирует внешнюю тепловую нагрузку (65 W), возникающую от лучистого теплообмена между поверхностями и поступающую по элементам крепления в корпусе. Внутренняя тепловая нагрузка (60 W) от электронного блока отводится при помощи пружинного теплопровода, изготовленного из латуни марки Л63, с заданным количеством лепестков. Используя выражение (4), определим тепловую мощность, отводимую одним лепестком. Лепесток сечением $F = 1$ mm и длиной $L = 1.7$ mm с коэффициентом теплопроводности для латуни Л63 $\lambda = 1.08$ W/(cm·K) [6] при среднем градиенте температур ~ 50 K (рабочий диапазон температур от -20 до 80°C) отводит тепловую нагрузку ~ 3 W. Выделяемая тепловая мощность от электронного блока равна сумме мощностей составляющих его элементов. С учетом этого вдоль электронного блока установлены пружинные теплоотводы с количеством лепестков, достаточным для поглощения выделяемой тепловой мощности. Данные расчетов приведены в таблице.

Таблица

Наименование элемента блока электроники	Выделяемая тепловая мощность, W	Количество лепестков теплоотвода, шт	Отводимая тепловая мощность, W
Плата блоков питания	8.8	3	9
Плата процессора	4.5	2	6
Трансформатор	7.5	2	6
Плата выпрямителей	39.2	13	39
Итого:	60	–	60

Как видно из таблицы, суммарные величины выделяемой и отводимой тепловых мощностей электронного блока равны по 60 W, что свидетельствует о компенсации внутренней тепловой нагрузки.

Решение этих вопросов позволило создать термостат для скважинного прибора (рисунок). Термостат состоит из сосуда 1 кольцеобразной формы со встроенным змеевиком 2. Сосуд подвешен к верхнему фланцу 3 на горловинах 4 и 5 и размещен в корпусе 6. На верхнем фланце установлен вентиль 7

для откачки воздуха из вакуумных полостей. Сосуд охватывает скважинный прибор 8 с пружинными теплоотводами 9 и установлен на теплоизолированной опоре 10.

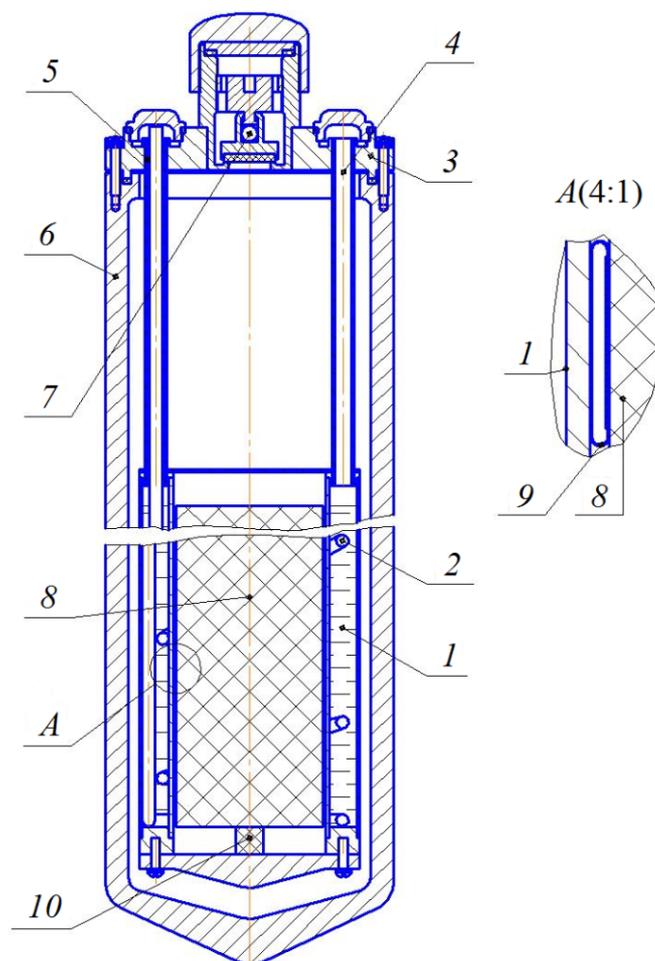


Рис. Схема устройства термостата со скважинным прибором: 1 – сосуд; 2 – змеевик; 3 – верхний фланец; 4, 5 – горловины; 6 – корпус; 7 – вентиль; 8 – скважинный прибор; 9 – пружинный теплоотвод; 10 – опора

Сосуд предназначен для компенсации тепловой энергии, поступающей от стенки скважины и со стороны скважинного прибора, путем нагрева предварительно охлажденного рабочего тела (7 kg воды).

Змеевик, встроенный в сосуд, служит для охлаждения рабочего тела до заданной (-20°C) температуры путем прокачки через него жидкого азота. Верхний фланец удерживает сосуд на четырех горловинах, две из которых (4) предназначены для заправки рабочего тела, а две другие (5) – для вывода концов змеевика наружу.

Корпус выполнен из материала повышенной прочности и предохраняет конструкцию термостата от внешнего давления при глубинном погружении.

В процессе исследования электронный блок скважинного прибора с помощью пружинного теплоотвода передает рабочему телу выделяемую тепло-

вую энергию. Пружинный теплоотвод жестко закреплен на скважинном приборе, а своими лепестками, выполненными в виде дуги, контактирует с сосудом, причем контакт скользящий и позволяет скважинному прибору двигаться по внутренней поверхности сосуда.

Работа термостата осуществляется следующим образом. Сосуд через горловины 4 заполняют водой массой 7 kg. Из вакуумных полостей через вентиль откачивают воздух до остаточного давления не более 10^{-4} mm Hg. В змеевик горловины 5 подают жидкий азот, охлаждая и вымораживая воду до температуры порядка -20°C , после чего все горловины закрывают. Термостат подготовлен к погружению в скважину. В дальнейшем при подготовке термостата к работе производят только охлаждение рабочего тела.

Технические характеристики термостата

Температура для скважинного прибора за один цикл работы, $^{\circ}\text{C}$	не превышает 80
Максимальное время пребывания в рабочей среде за один цикл работы, h	не менее 10
Допускаемое давление наружной среды, atm	до 450
Объем сосуда для рабочей жидкости, l	9.5
Количество заливаемой воды, kg	7
Требуемое количество жидкого азота на один цикл работы, kg	16.5
Высота конструкции термостата, m	5
Диаметр конструкции термостата, mm	102
Масса термостата, kg	150
Суммарная масса погружаемого устройства, kg	2100

Созданный для скважинного прибора термостат позволяет:

- полностью компенсировать внешнюю и внутреннюю тепловую нагрузку;
- нормально функционировать в условиях агрессивной среды;
- в качестве нерасходуемого рабочего тела использовать наиболее распространенное вещество – воду;
- для аккумуляции холода на один цикл работы использовать недорогое, широко распространенное криогенное вещество – жидкий азот в количестве 16.5 kg;
- оперативно производить многократную подготовку к работе.

1. *Справочник по физико-техническим основам криогеники*, М.П. Малков (ред.), Энергия, Москва (1973).
2. *В.Г. Фастовский и др.*, Криогенная техника, В.Г. Фастовский (ред.), Энергия, Москва (1967).
3. *Справочные таблицы. Физика.* «Infotables.ru/fizika/353-udelnaya-teploemkost-tablitsa».
4. *Hutte*, Справочник для инженеров, Т. 2, Машгиз, Ленинград (1939), с. 1254–1256.

5. Б.Н. Формозов, Экспериментальная техника в физике сверхпроводников, Вища школа, Киев (1978), с. 7.
6. *Материалы* в приборостроении и автоматике. Справочник, Ю.М. Пятин (ред.), Машиностроение, Москва (1982), с. 390.

D.V. Varyukhin, P.N. Postol

THERMOSTAT FOR OPERATION OF A DOWNHOLE TOOL IN HIGH-TEMPERATURE DOWNHOLES

The design and function of a developed thermostat are described. The device provides the conditions required for the operation of a downhole tool within the time period of processing of a high-temperature downhole.

Keywords: thermostat, downhole, heat energy, heat input, working medium

Fig. Scheme of a thermostat and a downhole tool: 1 – container; 2 – coil; 3 – top flange; 4, 5 – necks; 6 – case; 7 – valve; 8 – downhole tool; 9 – spring-type heat spreader; 10 – foundation