РАЗДЕЛ I. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Котельников Л.Н.

Регуляризация температурного поля наклонного термосифона, заполненного водой, в режиме термостатирования

*ООО Центр метрологических исследований «Урал-Гео»
(Россия, Уфа)*

doi:10.18411/sciencepublic-12-12-2019-01

idsp: sciencepublic-12-12-2019-01

Аннотация

Экспериментально исследованы параметры неоднородности температурного поля, время регуляризации температурного режима в экспериментальном образце водяного термостата с естественной циркуляцией, работающего на основе принципа однофазного наклонного термосифона. Экспериментально исследовано влияние пульсаций температуры на погрешность сличения показаний цифровых термометров. На основе полученных результатов сделан вывод об эффективности использования термостата с наклонной термокамерой для калибровки каналов измерения температуры и давления скважинной аппаратуры в диапазоне 100-150 °С и более.

Ключевые слова: наклонный термосифон, термостат, регуляризация температурного поля, калибровка, скважинный прибор, канал измерения температуры

Увеличение глубин разведочных и эксплуатационных нефтяных и газовых скважин и расширение географии осваиваемых нефтегазовых месторождений в России и в странах СНГ привели к усложнению геотермических условий в скважинах. На ряде нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири максимальные значения температуры на забое эксплуатационных и разведочных скважин составляют 110- 150 °С и более. [4]. Высокие температуры пластов в южных областях России и в Прикаспии привели к необходимости разработки скважинных преобразователей температуры с верхним пределом измерений в 150 °С и более ещё в 80-х годах прошлого века. [7]. В последние годы для нужд нефтегазового комплекса России и стран СНГ была разработана высококачественная комплексная скважинная аппаратура (КСА) с верхним пределом рабочей температуры 120-150 °С. Созданы опытные образцы (КСА) с верхним пределом рабочей температуры 177 °С. Для калибровки каналов измерения температуры (КИТ) и каналов измерения давления (КИД) КСА необходимы термостаты с рабочей объёмом, позволяющим размещать в нём крупногабаритные скважинные приборы. Поэтому метрологическое оборудование, применяемое для калибровки датчиков температуры в системе Росстандарта не пригодно для калибровки скважинных приборов.

Для калибровки КИТ и КИД КСА в диапазоне 0- 100 °С используются водяные термостаты с принудительной циркуляцией. Использование водяных термостатов для калибровки КСА в диапазоне 100- 150 °С и выше сдерживается отсутствием доступных и надёжных малогабаритных циркуляционных водяных насосов. А использование для калибровки в диапазоне 100- 150 °С и более термостатов с высокотемпературным теплоносителем типа ПМС снижает экономические показатели ремонтно- поверочных лабораторий и увеличивает пожароопасность работ.

Решение этой проблемы может быть найдено путём применения термостатов с естественной конвекцией воды на основе однофазного либо двухфазного термосифона с герметизацией рабочей полости. Экспериментальные исследования теплового

режима такого термостата с вертикальной термокамерой диаметром 160 мм и длиной 2000 мм, проведенные в ВНИИнефтегеофизика в 1990 г. показали [5], что средний градиент температуры в рабочей зоне составил 0,4 °С/м, а время достижения регулярного теплового режима [8] естественного охлаждения после отключения форсированного нагрева составило 26-30 мин. Такое значительное время регуляризации теплового режима уменьшает эффективность работы при градуировке и калибровке скважинной аппаратуры.

В последние годы усилился интерес к исследованиям теплового режима наклонных термосифонов, заполненных различными видами теплоносителей, для отвода избыточного тепла. Это вызвано тем, что в наклонном положении резко улучшаются теплогидравлические характеристики термосифона [1]. Экспериментальные исследования термосифона, заполненного водой, с диаметром трубы 20 мм показали, что при отклонении от вертикали на 60°, коэффициент теплоотдачи для радиального потока тепла увеличивается в 3, 5-6 раз [9]. Исследования турбулентного режима теплообмена наклонного термосифона, заполненной жидким натрием, показали, что при отклонении от вертикального положения на 65° интенсивность теплообмена в осевом направлении увеличивается более чем в 10 раз [2].

В опубликованных источниках отсутствуют результаты исследований теплового режима наклонного термосифона, заполненного водой, с теплоизолированной полостью при минимальных потоках тепла в радиальном и осевом направлениях, что характерно для режима термостатирования. Отсутствуют также результаты исследований динамики установления регулярного теплового режима. Геометрические размеры исследуемых образцов термосифонов в опубликованных работах не соответствуют требованиям, предъявляемым к размерам термокамеры для калибровки КСА.

Цель данной работы – обосновать эффективность использования термостата на основе термосифона, заполненного водой, с наклонной теплоизолированной термокамерой, для калибровки КИТ и КИД КСА с верхним пределом рабочей температуры 120-150 °С и более.

Для достижения этой цели необходимо исследовать зависимость параметров неоднородности температурного поля экспериментального образца термостата от угла наклона термокамеры, динамику установления регулярного теплового режима естественного охлаждения, влияние пульсаций температуры в рабочем объеме на погрешность калибровки КИТ.

Описание экспериментальной установки

Основой экспериментальной установки является термокамера, изготовленная из трубы диаметром 154х2 мм и длиной 2500 мм с приваренными к ней фланцами. Материал термокамеры – нержавеющая сталь. На съёмной крышке нижнего фланца установлен электрический нагревательный элемент мощностью 4 кВт и две гильзы для датчиков термометров сопротивления. На съёмной крышке верхнего фланца приварены две втулки, в которых установлены два продольных экспериментальных зонда длиной 2000 мм из нержавеющих труб диаметром 6х0,5 мм с размещёнными в них двумя датчиками термометров сопротивления типа ТС-1388. Предусмотрена возможность перемещения датчиков в любую точку зондов. Кроме этого на верхнем фланце приварены два штуцера для герметизации в термокамере двух гибких зондов из термостойкой резины, в которых размещены гибкие кабели двух дополнительных датчиков термометров сопротивления ТС-1388. Эти датчики могут быть зафиксированы в любой точке рабочего объема термокамеры с помощью перемещаемых двух опор, прикрепляемых к продольным зондам.

Наружная боковая поверхность термокамеры теплоизолирована скорлупами из пенополиуретана толщиной 50 мм в соответствии с требованиями к качеству теплоизоляции, изложенными в [6]. Термокамера установлена на основании с возможностью изменения угла наклона к горизонту от 0 до 90 ° и снабжена предохранительным клапаном, электроконтактным манометром, вентилями для наполнения термокамеры водой и выхода пара в процессе испарительного охлаждения, а также герметичным компенсатором объёма расширяющейся при нагревании воды.

Кабели термометров сопротивления подключены по четырёхпроводной схеме к цифровым преобразователям температуры. Для регистрации показаний использована программа «Terminal.exe», позволяющая производить синхронную цифровую регистрацию показаний термометров сопротивления с интервалом от 1 с и более.

Метрологическое обеспечение

Перед выполнением экспериментальных исследований все используемые термометры сопротивления в комплекте с цифровыми преобразователями проходили градуировку в калибраторах температуры КТ- 110 и КТ- 500. После градуировки была проведена взаимная градуировка термометров в комплекте с цифровыми преобразователями в калибровочном пенале в термостате с глубиной погружения в теплоноситель не менее 500 мм. При этом показания одного из комплекта измерителей температуры принимались за эталонные. Для остальных измерителей температуры создавалась таблица поправок на показания по отношению к показаниям измерителя, принятому за эталонный. После регистрации пространственной разности температуры в процессе проведения экспериментальных исследований результаты измерений корректировались с учётом таблицы поправок. Описанная методика позволила уменьшить погрешность измерения пространственной разности температур до 0,02 К при абсолютной погрешности измерений температуры 0,1- 0,15 К.

Исследуемые параметры температурного поля

В процессе проведения исследований основное внимание уделялось решению задач для достижения выше поставленной цели:

- 1) определение параметров неоднородности температурного поля в рабочей зоне;
- 2) определение времени регуляризации температурного поля после отключения форсированного нагрева;
- 3) определение влияний пульсаций температуры на погрешность калибровки КИТ.

Исследование параметров неоднородности температурного поля

В процессе исследований определялись следующие параметры неоднородности температурного поля в рабочей зоне длиной 2000 мм:

- а) среднее значение осевого градиента температуры;
- б) градиент температуры по ширине поперечного сечения термокамеры;
- в) градиент температуры по высоте поперечного сечения термокамеры.

В процессе определения параметров неоднородности температурного поля выполнялась синхронная регистрация показаний измерителей температуры. Для показаний каждого измерителя находилось среднее значение из 10 отсчётов.

При определении среднего значения осевого градиента температуры в рабочей зоне устанавливали по оси термокамеры с интервалом 600 мм датчики 4-х измерителей температуры. Результаты исследований отражены на рис.1 в виде зависимости среднего значения осевого градиента от угла наклона оси термокамеры к горизонту в контрольной температурной точке 150 °С.

Рис 1. Зависимость градиента температуры от угла наклона термокамеры к горизонту при 150 °C

Для определения неравномерности температуры по ширине поперечного сечения термокамеры использовались показания 3-х измерителей температуры. Датчик одного из измерителей устанавливали в центре поперечного сечения. Датчики двух других измерителей устанавливали справа и слева от первого датчика с интервалом 50 мм. При этом измерения производились в тех же точках по длине термокамеры, что и при определении осевого градиента температуры.

В результате исследований было установлено, что по ширине поперечного сечения измеренные значения неравномерности не превышают разрешающей способности измерителей температуры- 0,01 К.

Для определения градиента температуры по высоте поперечного сечения термокамеры использовались также показания 3-х измерителей температуры. Датчик одного из измерителей устанавливали в центре поперечного сечения термокамеры. Датчики двух других измерителей устанавливали симметрично выше и ниже датчика первого измерителя на расстоянии от него 50 мм.

Результаты измерений показали, что в контрольной температурной точке 150 °C средний градиент температуры не превышает значения 0,01 К/см. При этом градиент температуры выше оси термокамеры имеет положительное значение, а градиент температуры ниже оси термокамеры имеет отрицательное значение.

Исследование времени регуляризации температурного режима

Время регуляризации температурного режима определялось в двух вариантах:

- без скважинных приборов;
- с двумя скважинными приборами типа КСА-Т12.

Для определения времени регуляризации включали форсированный нагрев термокамеры на интервал времени не менее 10 мин. После достижения значения температуры воды в термокамере 120 °C отключали нагрев и производили регистрацию температуры в термокамере двумя измерителями температуры, удалёнными от верхнего фланца на расстояние 500 мм и 1000 мм. За время регуляризации принимали максимальное время достижения постоянной скорости охлаждения теплоносителя. Указанную операцию проводили при различных углах наклона термокамеры с шагом в 10°. Результаты измерений представлены на рис. 2. При определении времени регуляризации по второму варианту учитывалось дополнительно время регуляризации показаний скважинных приборов.

Рис.2. Время регуляризации температурного режима. Ряд 1- без скважинных приборов. Ряд 2-с двумя скважинными приборами

Определение погрешности калибровки, вызванной пульсациями температуры в термокамере

Для определения погрешности калибровки, вызванной несинхронностью прохождения температурных волн, фиксируемых как случайные колебания температуры, выполняли синхронную регистрацию показаний двух измерителей температуры, датчики которых размещались в одном поперечном сечении термокамеры. При этом в одной серии измерений один датчик размещался в центре поперечного сечения, а другой датчик – на расстоянии 50 мм по ширине поперечного сечения. В другой серии измерений два датчика измерителей температуры размещались на расстоянии 10 мм друг от друга. После наступления регулярного теплового режима охлаждения в контрольной температурной точке выполняли синхронную регистрацию не менее 30 пар показаний с интервалом времени 2 с. Определяли среднее значение показаний двух датчиков. За погрешность калибровки, вызванную случайными колебаниями температуры, принимали разность средних значений показаний двух датчиков.

Результаты исследований. При расстоянии между датчиками 50 мм искомая погрешность составила 0,04 К. При расстоянии между датчиками 10 мм искомая погрешность составила 0,02 К. Для повышения точности сличения показаний эталонного измерителя температуры с показаниями КИТ необходимо датчик эталонного измерителя температуры приближать к датчику КИТ КСА и выполнять сличение показаний в режиме многократных отсчётов и осреднения результатов измерений.

Обсуждение результатов исследований

Результаты исследований параметров неравномерности температурного поля в термокамере показывают, что при углах наклона термокамеры к горизонту в диапазоне 20- 35 ° эти параметры не уступают аналогичным параметрам установки УКСТМ- 100 с принудительной циркуляцией воды с верхним пределом рабочей температуры 100 °С. Но при этом верхний предел рабочей температуры наклонной термокамеры с естественной циркуляцией составляет 180 °С.

Результаты исследований времени регуляризации температурного поля показывают, что при углах наклона термокамеры к горизонту в диапазоне 20-35° время регуляризации температурного поля уменьшается в 12 раз по сравнению с вертикальной термокамерой для случая без скважинных приборов, и в 6 раз для случая термокамеры с двумя скважинными приборами. Этот эффект объясняется резким

уменьшением теплогидравлического сопротивления термокамеры при указанных оптимальных углах наклона, обеспечивающим высокую изотермичность теплоносителя, а также относительно малой тепловой инерцией слоя теплоизоляции термокамеры. Расчётное время показателя тепловой инерции теплоизоляционной оболочки, рассчитанное по формулам, приведенных в [3] составляет 27 с.

Выводы

Экспериментальные исследования температурного поля термокамеры в режиме работы однофазного наклонного термосифона показали перспективность использования термостата с естественной циркуляцией воды для повышения эффективности и точности калибровки КИТ КСА при температурах 100-150 °С и более. Не вызывает сомнения и применимость такого термостата для калибровки КИД, а также для проверки работоспособности всех каналов КСА в диапазоне температур 100-150 °С и более. Для некоторых частных случаев, например, для определения времени выдержки в контрольной температурной точке при калибровке скважинного кварцевого манометра, необходимы дополнительные исследования.

Работа была выполнена за счёт внутренних средств предприятия. Основанием для проведения работы послужили результаты испытаний макетного образца термостата с наклонной термокамерой.

1. Белов А. А. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик наклонных термосифонов для охлаждения объектов ядерной энергетики. Автореф. дис. на сиск. учёп. степ. канд. технич. наук. (05.11. 03)/ Белов Алексей Анатольевич; Научно-произв.объединение по исследованию и проектированию энергет. Оборудования им И.И Ползунова СПб, 2007, 22 с.
2. Васильев А. Ю., Колесниченко И. В., Мамыкин А. Д., Фрик П. Г., Халилов Р. И., Пахолков В. В.. Турбулентный конвективный теплообмен в наклонной трубеПлавник А. Г., , заполненной натрием. Журнал технической физики, 2015, том 85, вып. 9, с. 45- 49.
3. Дульнев Г. Н. Теория тепломассообмена. СПб, 2012, 195 с.
4. Казаненков В. А., Курчиков А. Р., Плавник А. Г., Шапорина М. Н. Геотермические условия и нефтегазоносность тюменской и малышевской свит западносибирского бассейна. Геология и геофизика, 2019, т. 60, С. 209-216.
5. Котельников Л. Н. Метрологическое обеспечение температурных измерений в скважинах // Метрологическое обеспечение геофизических исследований скважин. Гл. 9.2. М.: Недра, 1991. С. 196- 203.
6. Котельников Л. Н. Повышение точности калибровки канала измерения температуры // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2017. Вып.2(296) С. 57-66.
7. Шапошников М. Ю. Импульсный измерительный преобразователь скважинного термометра. // Геофизические исследования эксплуатационных скважин. (Тр. ВНИИ нефтепромгеофизики, вып.15), Уфа, 1985, С. 49-54.
8. Ярышев Н. А. Теоретические основы измерений нестационарных температур. Л.1967. 300 с.
9. G. S. H. Lock. Natural Convection in the inclined Cranked Thermosyphon. Journal of Heat Transfer. P.166- 172, Vol. 115, February 1993.

Джаватов Д.К.

Проблемы повышения эффективности электроэнергетического освоения Кумухского месторождения термальных вод

*ФГБУН «Институт проблем геотермии» ДНЦ РАН
ФГБОУ ВО ДГУ
(Россия, Махачкала)*

doi:10.18411/sciencepublic-12-12-2019-02

idsp: sciencepublic-12-12-2019-02

Кумухское месторождение термальных вод (ТВ) расположено на Северодагестанской равнине. На месторождении в триасовых отложениях, на глубине 4850 м, залегает водоносный горизонт эффективной мощностью 65 м.