

**В. Г. Левашкевич, А. С. Глаз**

*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

## **ТЕМПЕРАТУРНЫЕ АНОМАЛИИ В СКВАЖИНАХ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА**

Проведение систематических геофизических, в том числе, геотермических исследований в скважинах, является одним из основных элементов обеспечения технологической и экологической безопасности подземных хранилищ газа (ПХГ). Информативность геотермических исследований в скважинах обусловлена, в основном, дифференциацией горных пород по теплофизическим свойствам. Часто геотермические аномалии в скважинах связаны с местными гидродинамическими и физико-химическими процессами, которые наблюдаются в пластах-коллекторах искусственных газовых хранилищ при нагнетании или отборе газа. Наиболее существенным агентом искажения теплового поля являются пластовые воды и газы, эффекты циркуляции которых находят отражение на скважинных термограммах. Выявление мест подобных перетоков газа и оценка их интенсивности являются важными показателями эксплуатации любого хранилища газа.

Ниже остановимся на оценке возможных аномалий температуры и ее градиента, которые возникают при вертикальном перетоке газа по заколонному пространству скважины или по ее стволу.

Предельная величина температурной аномалии, вызванная перетоком газа из пласта-коллектора в вышележащий водоносный горизонт через пористую среду, обычно не превышает первых единиц градусов Цельсия. При этом, термограмма скважины имеет вогнутость к оси глубин. При перетоке пластовой воды для тех же условий наблюдается положительная аномалия температуры. Все эти явления связаны с дроссельным эффектом. В результате, совместное движение газа и воды вызывает аномалию пониженной температуры в десятые доли градуса. Подобные значения находятся в пределах точности промыслового термокаротажа скважин и часто не могут быть уверенно определены по производственным термограммам. Для этого необходимо использовать приборы с точностью измерения температуры в скважине не хуже (0,03–0,04) °С.

Искажение теплового состояния пород в пределах скважин за счет вертикального тепломассопереноса наблюдается в случае перетока пластовых флюидов посредством фильтрации через пористую среду, вдоль цементного кольца из-за его негерметичности, или по стволу скважины. Как правило, переток газа происходит вверх в вышележащие горизонты, иногда вплоть до дневной поверхности. В этих условиях формирование тепловых аномалий определяется, в общем, следующими факторами:

- 1) конвективным переносом тепла;
- 2) дроссельным эффектом (выделением или поглощением тепла при изменении давления);
- 3) конденсационным эффектом (выделением или поглощением тепла при разделении флюидных смесей);
- 4) диффузионным переносом вещества на границах фаз и связанным с ним смешиванием, что приводит к выделению или поглощению тепла.

Оценим предельную величину тепловых аномалий, формирующихся в результате перечисленных процессов. При этом отметим, что в пластовых условиях двумя последними факторами можно пренебречь. Кроме того обратим внимание на то, что тепловой эффект за счет конвекции и дросселирования поддается лишь граничным оценкам.

На рис. 1 приведена принципиальная схема перетока газа по заколонному пространству скважины и по ее стволу, а также обобщенный вид изменения температуры и ее градиента по глубине той же скважины. Такая схема отражает переток газа из основного пласта-коллектора в вышележащий пористый пропласток. При измерении температуры в скважине, по которой происходит переток газа, будут наблюдаться максимальные искажения температуры и ее градиента. В этом случае наиболее полно проявляется эффект Джоуля-Томсона. Однако из-за технических сложностей на практике специальные термометрические исследования в таких скважинах провести не всегда удастся. Обнаружение факта перетока газа может быть установлено в соседних скважинах по характерному виду термограмм и градиентам температуры. При этом, чем ближе исследуемая скважина к месту перетока, тем точнее может быть оценена его интенсивность.

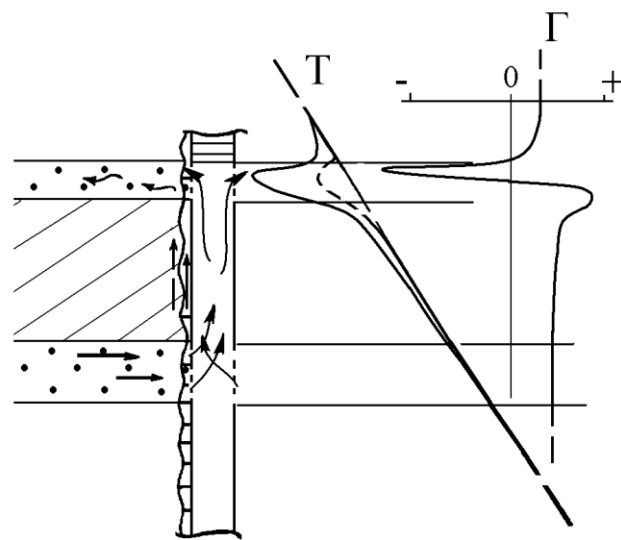


Рис. 1. Схематичное изображение перетока газа в пределах скважины и его отображение в кривых изменения температуры (Т) и ее градиента (Г) по глубине

Вклад конвективного переноса тепла в горных породах может быть оценен по формуле расчета плотности теплового потока ( $Q$ ):  $Q = q_k + c_p \cdot dT_1 \cdot V_z$ , где  $q_k$  – невозмущенный тепловой поток на интервале фильтрации, слагаемое  $c_p \cdot dT_1 \cdot V_z$  – определяет вклад теплового потока за счет конвекции,  $c_p$  – объемная теплоемкость флюида,  $dT_1$  – разность температур между конечной и начальной точками потока,  $V_z$  – вертикальная составляющая скорости фильтрации. Нетрудно показать, что вклад конвективной составляющей особенно заметен при  $V_z > 1$  м/год, что практически всегда выполняется при эксплуатации подземных хранилищ газа в водных горизонтах.

Изменение температуры ( $dT_2$ ), вызываемое процессом перетока пластовых флюидов, например, по стволу скважины или по ее заколонному пространству из-за разности пластовых давлений, описывается известным уравнением Джоуля-Томсона:  $dT_2 = -E \cdot dP$ , где  $E$  – коэффициент Джоуля-Томсона,  $dP$  – изменение давления. Величина коэффициента  $E$  и его знак зависят от физико-химических свойств пластовых жидкостей и газов и от условий их фильтрации. Его усредненные значения лежат в пределах: – (0,18–0,24) К/МПа – для воды и +(2,5–6,0) К/МПа – для газа в зависимости от его состава. При перетоке смесей двух флюидов  $E$  рассчитывается по формуле с учетом их массового отношения.

Предельная величина изменения температуры ( $dT$ ), как сумма конвективной составляющей ( $dT_1$ ) и составляющей за счет дроссельного эффекта ( $dT_2$ ), может быть обеспечена только при свободном перемещении газа по стволу скважины или по заколонному пространству. В случае перетока флюидов через пористую среду суммарный прирост температуры ( $dT_n$ ) в пределах принимающего пласта необходимо перераспределить на скелет среды.

Приведем результаты количественной оценки термического эффекта, вызванного перетоком газа из пласта-коллектора в вышележащие пласты на расстоянии 100 м на примере геологических условий Прибугского ПХГ.

Основной пласт-коллектор Прибугского ПХГ приурочен к песчаникам страдечских отложений, перекрытых мощной (до 70 м) толщиной глины тех же отложений. Интервал перетока газа в вышележащие спановские отложения составляет 100 м (70 м – страдечские отложения и 30 м – спановские). Термометрические исследования скв. 26-к, расположенной в купольной части структуры, позволили рассчитать средневзвешенный градиент температуры в зоне перетока – 18,0 мК/м. В этом случае, прирост температуры за счет конвективной компоненты составляет 1,8 °С.

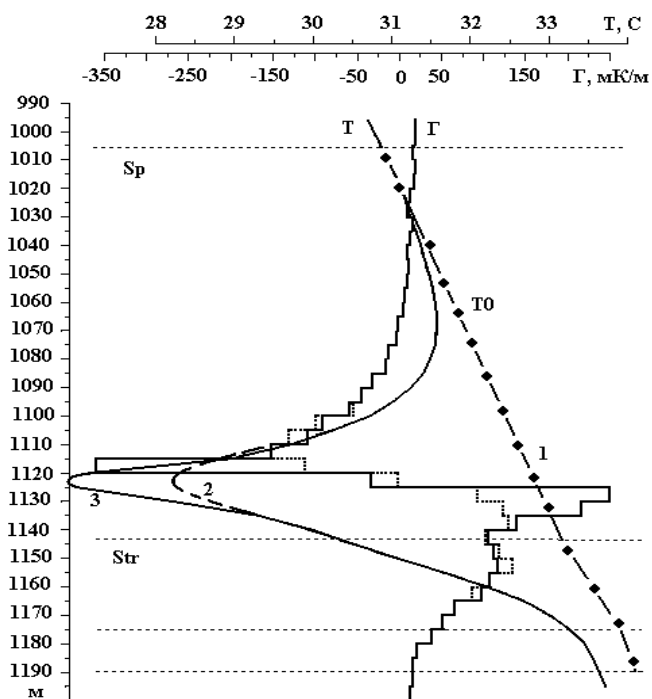


Рис. 2. Термометрия участка спановских (Sp) и страдечских (Str) отложений скважины 26-к Прибугского ПХГ, выполненная в разное время: 1 – в 1998 году, 2 – в апреле 2009 г. и 3 – в ноябре 2009 г.,  $T_0$  – ненарушенная термограмма,  $T$  – нарушенная термограмма,  $\Gamma$  – градиентограмма температуры

Для расчета составляющей аномалии температуры за счет эффекта Джоуля-Томсона использовали теплофизические параметры горных пород и газа для условий залегания основного пласта-коллектора хранения газа: глубина 1200 м, температура 30 °С.

При уравновешенном давлении, когда пластовое давление в искусственной залежи совпадает с гидростатическим, прирост температуры на интервале перетока 100 м за счет эффекта Джоуля-Томсона будет равен:  $dT_2 = -2,5 \text{ К/МПа} \cdot 1,0 \text{ МПа} = -2,5 \text{ }^\circ\text{С}$ . Однако если учесть, что в области хранения газа среднее пластовое давление при полном заполнении хранилища превышает гидростатическое в среднем на 2 МПа, то не трудно рассчитать приращение температуры за счет дроссельного эффекта при перетоке газа из такой области. В этом случае  $dT_2 = -7,5 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Суммарный эффект ( $dT$ ) от свободного перетока газа по стволу или заколонному пространству скважины на интервале 100 м, при условии, когда в области хранения газа среднее пластовое давление совпадает с гидростатическим, будет составлять  $-0,7 \text{ }^\circ\text{С}$ . При перетоке газа в пористую среду изменение температуры породы ( $dT_p$ ), рассчитанное для конечной точки перетока для принятых условий Прибугского ПХГ будет равно лишь  $-0,025 \text{ }^\circ\text{С}$  и находится на пределе точности термометров. При свободном перетоке газа из области повышенного пластового давления (в условиях полного заполнения хранилища) возможно уменьшение температуры ( $dT$ ) в верхней части интервала перетока на  $5,7 \text{ }^\circ\text{С}$ . При распределении такой температуры на пористую среду уменьшение температуры в конечной области перетока ( $dT_p$ ) будет составлять  $-0,21 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Примером отражения вертикального перетока газа по не обсаженному участку одного из стволов скважины 26-к Прибугского ПХГ на кривых изменения температуры и ее градиента являются результаты специальных термометрических исследований скважины в различные периоды эксплуатации хранилища (рис. 2). Исследования выполнены в пределах спановских и страдечских отложений обсаженного ствола скважины, расположенного рядом, с не обсаженным стволом с погрешностью  $0,02\text{--}0,04 \text{ }^\circ\text{С}$ . Приведенные на рис. 2 результаты свидетельствуют о вертикальном перетоке газа из основного пласта-коллектора страдечских отложений по свободному стволу скважины до места его закупорки на глубинах 1120–1122 м в пределах спановских отложений. При этом отмечается зависимость аномалии температуры от степени заполнения ПХГ газом: весной, когда газовая залежь характеризуется минимальным пластовым давлением, аномалия температуры уменьшается, а осенью аномалия увеличивается. На этих глубинах происходит трансформация вертикального перетока газа в горизонтальный путем заполнения пористого пространства горных пород и создания техногенной залежи. За счет эффекта Джоуля-Томсона происходит резкое уменьшение температуры в верхней части

зоны перетока по отношению к равновесной температуре, измеренной до ввода ПХГ в эксплуатацию. Аномалия температуры достигает  $-5,7^{\circ}\text{C}$ .