УДК 622.245.1

ТЕРМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ОБСАДНЫЕ КОЛОННЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ В СКВАЖИНАХ

♦♦♦♦♦

THERMAL LOADS ACTING ON CASING STRINGS DURING CHANGES IN WELL TEMPERATURE

Тихонов Евгений Владимирович
технический директор отдела буровых растворов
ООО «БУРСЕРВИС»
evgeny.tikhonovv@yandex.ru

Аннотация. При выполнении различных технологических операций в скважинах их температурный режим, как правило, существенно нарушается: одни участки нагреваются, другие – охлаждаются. При этом могут возникнуть значительные проблемы как на стадии сооружения скважины, так и в период её эксплуатации. В рамках данной статьи стоит задача оценить роль колебаний температуры на прочность обсадных колонн, так как их состояние определяет возможность существования самой скважины как эксплуатационного объекта.

Ключевые слова: термические нагрузки, действующие на обсадные колонны; изменение температуры в скважинах; дополнительные осевые термические нагрузки; коэффициент термического расширения материала обсадных труб; приложенная осевая нагрузка к обсадным трубам; температурные условия в скважине к моменту защемления колонны; максимально возможные термические нагрузки.

Tikhonov Evgeny Vladimirovich
Technical Director
of the Drilling Fluids Department
of «BURSERVICE» LLC
evgeny.tikhonovv@yandex.ru

Annotation. When performing various technological operations in wells, their temperature regime is usually significantly disrupted: some sections heat up, others cool down. In this case, significant problems can arise both at the stage of well construction and during its operation. Within the framework of this article, the task is to assess the role of temperature fluctuations on the strength of casing strings, since their condition determines the possibility of the existence of the well itself as an operational facility.

Keywords: thermal loads acting on casing strings; change in temperature in wells; additional axial thermal loads; coefficient of thermal expansion of casing material; applied axial load to casing strings; temperature conditions in the well at the moment of clamping of the string; maximum possible thermal loads.

Многочисленные геофизические исследования качества цементирования обсадных колонн показывают, что на практике никогда не удаётся добиться абсолютного заполнения заколонного пространства скважины тампонажным материалом. Поэтому в скважинах имеются зоны, в которых цементное кольцо либо одностороннее, либо вообще отсутствует.

Такие незацементированные интервалы обсадных колонн можно отождествить с жёстко закреплённым на концах стержнем, подверженным влиянию положительных и отрицательных перепадов температуры по отношению к естественной температуре горных пород, составляющих разрез скважины. В результате нагрева (положительный перепад температуры) участок колонны стремится удлиниться, но лишённый этой возможности в результате защемления на концах будет испытывать дополнительные сжимающие осевые нагрузки. Этот же участок колонны в результате охлаждения стремится укоротиться, но лишённый этой возможности по указанной выше причине будет испытывать дополнительные растягивающие осевые нагрузки. Сжимающие нагрузки могут привести к потере устойчивости и косому срезу колонны со смещением концов, или к распору муфтового соединения, а растягивающие нагрузки, как правило, складывающиеся с остаточными силами тяжести, могут привести к разрыву обсадной колонны или к страгиванию резьбы. Положение может существенно усугубиться, если колебания температуры сопровождаются колебаниями давления внутри обсадной колонны, т.к. при увеличении давления длина защемлённого участка колонны уменьшается за счёт радиальной деформации, а при уменьшении давления происходит обратный процесс – удлинение колонны.

Используя известные положения науки о сопротивлении материалов, нетрудно рассчитать дополнительные осевые термические нагрузки, действующие на обсадную

колонну в результате изменений её температуры. В общем виде изменение длины ΔL защемлённого участка колонны от температурных изменений описывается следующим уравнением:

$$\Delta L = \int_{z_1}^{z_2} \lambda_{om} \cdot (T_0(z) - T(z)) \cdot dz \,, \tag{1}$$

где T_0 (z) – температурная функция глубины в момент защемления колонны; T (z) – температурная функция глубины, характеризующая максимальное отклонение температуры от начальных условий; z_1 и z_2 – глубина соответственно нижней и верхней границ защемления рассматриваемого участка колонны; λ_{om} – коэффициент термического расширения материала обсадных труб.

С другой стороны, удлинение защемлённого участка обсадной колонны связано с действующей на него дополнительной осевой нагрузкой уравнением деформации:

$$\Delta l = \frac{P}{E_{om}} \cdot \frac{z_2 - z_1}{F} \,, \tag{2}$$

где P – приложенная осевая нагрузка к обсадным трубам; E_{om} – модуль Юнга материала труб; F – средняя площадь поперечного сечения тела обсадных труб защемлённого участка колонны:

$$F = \sum \frac{F_i \cdot l_i}{z_2 - z_1} \,. \tag{3}$$

Здесь F_i и l_i – соответственно площадь сечения тела и длина i-той секции рассматриваемого интервала.

Для защемлённого на концах участка обсадной колонны можно приравнять правые части уравнений (1) и (2):

$$\frac{P}{E_{om}} \cdot \frac{z_2 - z_1}{F} = \int_{z_1}^{z_2} \lambda_{om} \cdot (T_0(z) - T(z)) \cdot dz \,. \tag{4}$$

Из уравнения (4) определим дополнительную осевую нагрузку, действующую на защемлённый участок колонны в результате происходящих в скважине изменений температуры:

$$P = F \cdot \int_{z_1}^{z_2} \lambda_{om} \cdot E_{om} \cdot (T_0(z) - T(z)) \cdot \frac{dz}{z_2 - z_1} \,. \tag{5}$$

Будем считать, что модуль Юнга и коэффициент термического расширения металла труб не зависят от температуры. Тогда:

$$P = \frac{\lambda_{om} \cdot E_{om} \cdot F}{z_2 - z_1} \cdot \int_{z_1}^{z_2} (T_0(z) - T(z)) \cdot dz \,. \tag{6}$$

Очевидно, что растягивающие дополнительные термические нагрузки (их знак плюс) складываются с осевыми силами тяжести колонны, а сжимающие (их знак минус) вычитаются из действующих в рассматриваемом сечении сил тяжести.

Выражение под знаком интеграла представляет собой среднеинтегральное значение перепада температуры по отношению к температурным условиям в скважине к моменту защемления колонны.

К сожалению, глубины защемления участков обсадных колонн в скважинах во многих случаях неизвестны. Поэтому в первом приближении будем считать, что длина участка защемления достаточно мала (но не менее длины полуволны при потере устойчивости обсадной колонны в скважине), а расположен участок защемления на любой глубине, где есть вероятность его возникновения. В этих условиях речь может

идти лишь об оценках максимально возможных термических нагрузках, которые могут быть выполнены, если определены:

- начальные температурные условия в скважине, при которых происходит защемление колонны (в этот момент дополнительные термические нагрузки равны нулю);
- распределение температуры по глубине скважины в случае максимального нагрева рассматриваемого участка колонны (в этот момент дополнительная осевая нагрузка максимальная сжимающая);
- распределение температуры по глубине скважины в случае максимального охлаждения рассматриваемого участка колонны (в этот момент дополнительная термическая осевая нагрузка максимальная растягивающая).

Для оценки степени опасности термических напряжений, возникающих в элементах конструкции газовых скважин, воспользуемся фактическими данными на примере подземного хранилища газа Краснодарского края в качестве исходной расчётной информации:

- устьевая температура нагнетаемого газа 30–40 °С (возможно её увеличение до 80–90 °С);
- устьевое давление при нагнетании газа в пласт 6,5–7,5 МПа (возможно его увеличение до 12,5 МПа);
- максимальная температура окружающего воздуха 40 °С;
- натяжение эксплуатационной колонны при оборудовании устья скважины производится усилием, равным 75 % от силы тяжести колонны.

Расчёты выполнены при помощи программы MathCAD.

Результаты расчётов следующие:

1. Максимальный нагрев обсадных колонн:
- промежуточной 28 °С (на устье);
- эксплуатационной 18 °С (на глубине 700 м).

2. Максимальное охлаждение обсадных колонн:
- промежуточной 17 °С (на глубине 1100 м);
- эксплуатационной 22 °С (на глубине 1330 м).

3. Максимальная дополнительная термическая сжимающая нагрузка на защемлённые участки обсадных колонн:
- промежуточной 64,4 тонн;
- эксплуатационной 25,5 тонн.

4. Максимальная дополнительная термическая растягивающая нагрузка на защемлённые участки обсадных колонн:
- промежуточной 39,1 тонн;
- эксплуатационной 27,7 тонн.

Анализ выполненных расчётов позволяет сделать следующие выводы:

1) нельзя игнорировать дополнительные термические напряжения, возникающие в обсадных колоннах;

2) величины дополнительных сжимающих осевых усилий, действующих на участки колонн в результате изменений температурных условий в скважинах таковы, что они способны привести не только к распору муфтовых соединений, но и к слому трубы, особенно в наклонных скважинах;

3) величины дополнительных растягивающих осевых усилий, действующих на обсадные колонны, могут не укладываться в рамки применяемых коэффициентов запаса прочности по осевым нагрузкам и привести к разрыву тела трубы или страгиванию резьбовых соединений.

Известно, что одним из методов, позволяющих свести к минимуму вероятность повреждения незацементированной части обсадной колонны в результате термических перегрузок, является выбор оптимальной величины её натяжения в конце ОЗЦ при оборудовании устья скважины. Надёжность такого метода компенсации термических напряжений гарантирована только в том случае, если нет опасности возникновения прихватов колонны горными породами. В идеале следовало бы растянуть колонну после спуска в скважину по всей длине до фильтра на величину силы её тяжести плюс

максимальная дополнительная сжимающая термическая нагрузка. При этом необходимо учесть, что максимальная растягивающая нагрузка на верхнюю секцию колонны $P_{\max}$ может достичь величины:

$$P_{\max} = P + P_{сж}^{\max} + P_{рас}^{\max}, \quad (7)$$

где P – сила тяжести обсадной колонны; $P_{сж}^{\max}$ – максимальная осевая сжимающая термическая нагрузка; $P_{рас}^{\max}$ – максимальная осевая растягивающая термическая нагрузка.

Конечно же, возникает сугубо технический вопрос: как осуществить дополнительное натяжение сверх силы тяжести, когда колонна подвешена на устье свободно? На наш взгляд, наиболее простой способ – использовать в качестве последней порции тампонажного раствора при цементировании обсадной колонны быстросхватывающуюся смесь (БСС), которая позволит быстро защемить призабойную часть обсадной колонны и произвести её натяжение необходимым усилием в первые часы ОЗЦ. В определённый момент времени ОЗЦ, когда БСС в заколонном пространстве приобретёт пластическую прочность, способную противостоять дополнительной осевой нагрузке со стороны колонны без признаков сдвига, колонна окажется жёстко защемлённой БСС. Этот момент времени следует использовать для окончательного натяжения колонны. По нашим оценкам этот момент соответствует началу схватывания БСС в забойных условиях, если интервал её расположения за колонной не менее 20 м.

Литература

1. Аббасов С.Г. Исследование распределения температуры по составной обсадной колонны / С.Г. Аббасов, В.Т. Мамедов // Нефтепромысловое дело. – 2015. – № 1. – С. 46–49.
2. Аббасов С.Г. Исследование распределения дополнительного температурного напряжения на составную конструкцию обсадных колонн // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2017. – № 7. – С. 49–52.
3. Колесова С.Б. Влияние температурного фактора на оборудование и технологические процессы добычи нефти / С.Б. Колесова, А.М. Насыров, М.Б. Полозов // Экспозиция Нефть Газ. – 2018. – № 2(62). – С. 42–45.
4. Петрушин Е.О. Промысловые исследования притока к горизонтальным скважинам и методы интенсификации нефтегазодобычи / Е.О. Петрушин, А.С. Арутюнян, Л.Г. Кусова // СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ – 2021: материалы XXII Международной молодёжной научной конференции (17–19 марта 2021 года, г. Ухта). – Ухта : Издательство ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», 2021. – С. 476–480.
5. Просёлков Ю.М. Термические напряжения в обсадных трубах паронагнетательных скважин / Ю.М. Просёлков, Е.Б. Просёлков // Технические средства, материалы и технология крепления скважин: сборник научных трудов ВНИИКРнефти. – Краснодар : ВНИИКРнефть, 1986. – С. 148–155.
6. Тагиров К.М. Расчёт температурных напряжений в обсадных колоннах скважин / К.М. Тагиров, Н.Г. Фёдорова // Газовая промышленность. – 2003. – № 12. – С. 57–59.
7. Тихонов Е.В. Анализ проблем бурения скважин и вскрытия нефтегазовых пластов в осложнённых условиях // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 4. – С. 206–222.
8. Тихонов Е.В. Анализ изменения плотности нагнетаемой в скважину аэрированной жидкости / Е.В. Тихонов, Л.Г. Кусова // Инженер-нефтяник. – 2025. – № 2. – С. 50–52.
9. Tikhonov E.V. Well completion in low-permeability reservoirs with minimum values of repression and depression / E.V. Tikhonov, G.V. Shelukhov, A.I. Perepelkin, P.P. Poryvkin // Readings of A.I. Bulatov. – 2025. – Vol. 2. – P. 137–143.
10. Шальская С.В. Геолого-геофизическая характеристика района Кущёвского ПХГ // Вестник студенческой науки кафедры информационных систем и программирования. – 2019. – № 1 (7). – С. 1–20. – URL : vsn.esrae.ru/ru/7-32
11. Шальская С.В. Техника и методика проведения ГИС-контроля на Кущёвском ПХГ // Вестник студенческой науки кафедры информационных систем и программирования. – 2019. – № 1 (7). – С. 21–39. – URL : vsn.esrae.ru/7-33

12. Шальская С.В. Оценка эффективности комплекса геофизических исследований скважин при решении нефтепромысловых задач на Кущёвской ПХГ / С.В. Шальская, Н.М. Лешкович // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2019. – № 3. – С. 98–119.

References

1. Abbasov S.G. Study of temperature distribution along the composite casing / S.G. Abbasov, V.T. Mamedov // Oilfield Engineering. – 2015. – № 1. – P. 46–49.
2. Abbasov S.G. Study of distribution of additional temperature stress on the composite structure of casing strings // Construction of oil and gas wells onshore and offshore. – 2017. – № 7. – P. 49–52.
3. Kolesova S.B. Influence of temperature factor on equipment and technological processes of oil production / S.B. Kolesova, A.M. Nasyrov, M.B. Polozov // Oil Gas Expo. – 2018. – № 2(62). – P. 42–45.
4. Petrushin E.O. Field studies of the inflow to horizontal wells and methods of intensifying oil and gas production / E.O. Petrushin, A.S. Arutyunyan, L.G. Kusova // SEVER-GEOECOTECH – 2021: Proceedings of the XXII International Youth Scientific Conference (March 17–19, 2021, Ukhta). – Ukhta : Publishing House of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ukhta State Technical University», 2021. – P. 476–480.
5. Proselkov Yu.M. Thermal stresses in the casing of steam injection wells / Yu.M. Proselkov, E.B. Proselkov // Technical means, materials and technology of well casing: Collection of scientific papers of VNIIKRneft. – Krasnodar : VNIIKRneft, 1986. – P. 148–155.
6. Tagirov K.M. Calculation of thermal stresses in well casing strings / K.M. Tagirov, N.G. Fedorova // Gas industry. – 2003. – № 12. – P. 57–59.
7. Tikhonov E.V. Analysis of well drilling problems and drilling into oil and gas formations in complicated conditions // Science. Technology. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2023. – № 4. – P. 206–222.
8. Tikhonov E.V. Analysis of changes in the density of aerated fluid injected into the well / E.V. Tikhonov, L.G. Kusova // Petroleum engineer. – 2025. – № 2. – P. 50–52.
9. Tikhonov E.V. Well completion in low-permeability reservoirs with minimum values of repression and depression / E.V. Tikhonov, G.V. Shelukhov, A.I. Perepelkin, P.P. Poryvkin // Readings of A.I. Bulatov. – 2025. – Vol. 2. – P. 137–143.
10. Shalskaya S.V. Geological and geophysical characteristics of the Kushchevsky UGS area // Bulletin of student science of the department of information systems and programming. – 2019. – № 1(7). – P. 1–20. – URL : vsn.esrae.ru/ru/7-32
11. Shalskaya S.V. Technique and methods of conducting GIS control at the Kushchevsky UGS // Bulletin of student science of the department of information systems and programming. – 2019. – № 1(7). – P. 21–39. – URL : vsn.esrae.ru/7-33
12. Shalskaya S.V. Evaluation of the effectiveness of a complex of geophysical studies of wells in solving oil field problems at the Kushchevsky UGS / S.V. Shalskaya, N.M. Leshkovich // Science. Technology. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2019. – № 3. – P. 98–119.