

**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ
ПРИ ЦЕМЕНТИРОВАНИИ СКВАЖИН**
PRESSURE CONTROL SYSTEM AT CEMENTATION OF WELLS

В. Г. Кузнецов, О. А. Макаров

V. G. Kuznetsov, O. A. Makarov

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

*Ключевые слова: скважина; обсадная колонна; цементирование; тампонажный раствор;
разрыв сплошности; автоматизированная система управления*

*Key words: well; casing column; cementing; cement slurry; break of continuity;
automated control system*

Одна из важных задач процесса строительства скважины — обеспечение качества цементирования обсадных колонн, что является основой длительной, безаварийной и эффективной ее эксплуатации. В практике промысловых работ качество цементирования обсадных колонн оценивают с помощью комплекса промыслово-геофизических методов: термометрии, метода акустической цементометрии и радиометрических методов, с помощью которых выявляют высоту подъема цемента, наличие или отсутствие его за колонной, определяют наличие каналов, трещин и каверн в цементном камне, изучают степень сцепления цемента с колонной и породами.

Цементирование обсадных колонн — сложный технологический процесс, состоящий из нескольких этапов, одним из которых является замещение в кольцевом пространстве буровой промывочной жидкости тампонажным раствором. На этом этапе вначале тампонажный раствор закачивают цементировочными агрегатами на максимально возможной скорости в скважину, а затем продавливают его в заколонное пространство, постепенно снижая подачу в соответствии с расчетом, контролируя давление на цементировочной головке и в кольцевом пространстве с помощью станции контроля цементирования (СКЦ). Создаваемое давление на цементировочной головке должно обеспечивать подъем тампонажного раствора в заколонном пространстве на заданную высоту, при этом давление в заколонном

пространстве не должно превышать давление гидроразрыва "слабого" пласта. При проектировании эти давления рассчитываются по формулам

$$P_{цг} = P_{кпс} - P_m + \Delta P_m + \Delta P_{кл} + P_y, \quad (1)$$

$$P_{кпз} = P_{кпс} + \Delta P_{кл}, \quad (2)$$

где $P_{кпс}, P_m, P_{уст}$ — гидростатические давления составных столбов жидкостей в кольцевом пространстве, в трубах и на устье, соответственно, МПа; $P_m, P_{кл}$ — гидродинамические давления, обусловленные движением жидкостей в трубах в кольцевом пространстве, рассчитываются по известным формулам Дарси — Вейсбаха, МПа.

Результаты расчетов показывают, что, как правило, при закачивании тампонажного раствора в скважину при постоянной подаче давление на цементировочной головке снижается до отрицательных значений, иногда достигая 10 МПа (рис. 1). Принимая во внимание, что такие отрицательные значения давления нереальны, общепринято следующее объяснение. Внутритрубное и кольцевое пространство представляют собой сообщающиеся сосуды, заполненные технологической жидкостью.

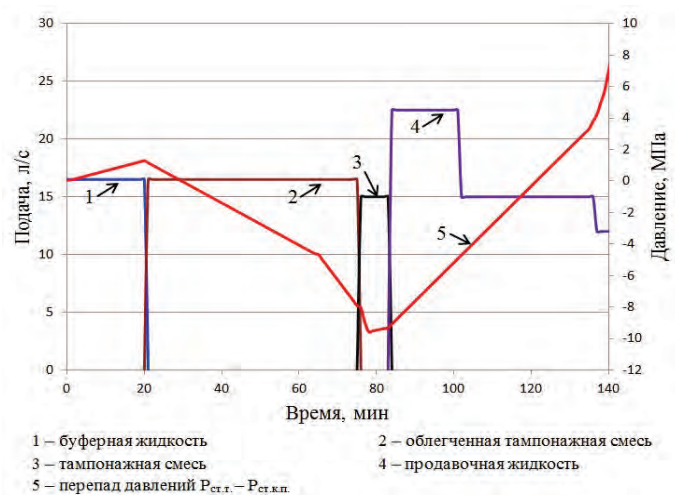


Рис. 1. Диаграммы подачи и давлений во время цементирования эксплуатационной колонны

При закачивании тампонажного раствора, имеющего больший удельный вес, чем у жидкости в кольцевом пространстве, в определенный момент происходит самопроизвольное, неконтролируемое его перемещение со скоростью, превышающей скорость закачивания. Возникает разрыв сплошности потока жидкости, и как следствие, образуется разрежение на устье скважины. В результате это может стать причиной некачественного разобщения продуктивных пластов.

Для того чтобы при закачке тампонажного раствора в обсадную колонну уровень его не снижался и у устья не образовывался вакуум, в кольцевом пространстве при выходе жидкости из скважины нужно поддерживать соответствующее противодавление, при этом должна быть исключена возможность гидроразрыва слабого пласта. Е. М. Соловьев предлагает ограничивать скорость восходящего потока жидкости путем создания необходимого противодавления на устье $P_{ук}$ [1]

$$P_{ук} \geq (P_m - P_k)_{ст} - (P_m + P_k)_{гд}, \quad (3)$$

где $(P_m - P_k)_{cm}$ — разность статических давлений в обсадной колонне и в кольцевом пространстве на глубине башмака, Па; $(P_m + P_k)_{zo}$ — сумма гидравлических потерь в колонне и в кольцевом пространстве, Па.

Если в уравнении (3) принять $P_{yk} = 0$ и решить его, то можно найти минимальную скорость восходящего потока W_{vak} , при которой противодействие не потребуется.

В работе П. Ф. Осипова [1] рассмотрена усовершенствованная технология закачки жидкостей в колонну при ее цементировании. Автор предлагает гидравлический режим цементирования, обеспечивающий применение одного или двух порций цементного раствора, остановку процесса с возвратом на любое предыдущее состояние с возможностью изменения расхода закачки («пробковый» режим замещения), процесс осуществляется с ограничением величины расхода жидкости, в том числе и при продавке. По результатам расчетов время, необходимое для реализации предлагаемой технологии цементирования, составит 5–6 часов, что в 2–2,5 раза дольше по сравнению с применяемыми на сегодняшний день технологиями. Предлагаемое решение вносит существенные изменения в технологию цементирования, приводит к значительному увеличению продолжительности цементирования колонны, потребует принятия дополнительных мер, обеспечивающих необходимое качество выполняемых работ.

В работе А. М. Лихущина [2] для обеспечения сплошности потока тампонажного раствора разработана новая технология с регулируемым на устье скважины противодействием, величина которого рассчитывается в соответствии со специально разработанной методикой. Расчет противодействия осуществляется в каждый момент времени в зависимости от положения нижней границы столба тампонажного раствора в колонне. При этом противодействие будет величиной переменной, зависящей от объема цементного раствора, закачанного в колонну. Результатом расчета являются необходимые величины противодействия, которые требуются создать на устье скважины с тем, чтобы обеспечить установившийся режим движения тампонажного раствора в колонне.

В соответствии с предложенной технологией цементирование эксплуатационных колонн осуществляется при герметизированном превентором устье скважины. В процессе закачки тампонажного раствора в обсадную колонну, после того как давление нагнетания станет равным нулю, плавным регулированием степени закрытия задвижки на блоке дросселирования создается необходимое противодействие в заколонном пространстве. По мере роста объема закачки цементного раствора в колонну возрастает и величина противодействия. Давление в заколонном пространстве регулируют с момента начала затворения тампонажной смеси и контролируют ее движение по всей длине обсадной колонны. В связи с этим числовой расчет выполняется для каждого положения столба тампонажного раствора в обсадной колонне, то есть, расстояния от его верхней границы до устья скважины (координата y) с интервалом 10 метров. Каждому значению y соответствует определенный объем цементного раствора или продавочной жидкости, который также рассчитывается через каждые 10 метров. Сразу после прекращения закачивания расчетного объема тампонажного раствора дроссельная задвижка закрывается. Устье скважины полностью герметизируется на время подготовительных работ перед пуском разделительной пробки. Предлагаемая технология цементирования интересна тем, что закрытие дроссельной заслонки позволяет создавать необходимое для компенсации «отрывного» течения противодействие. Однако полное закрытие дроссельной заслонки после подачи тампонажной смеси требует остановки насосной установки и дополнительных потерь времени на ожидание выхода цементного раствора в заколонное пространство. Автором допускается падение давления на входе в скважину до атмосферного, после чего дроссельная заслонка

формирует противодействие, компенсирующее «отрывное» течение, из чего следует вывод, что определенный промежуток времени нарушение сплошности потока тампонажной смеси в колонне допускается. В предлагаемом решении отсутствует оперативный контроль над процессом, у оператора нет возможности наблюдать за происходящим с экрана монитора, а в случае поглощения или гидроразрыва пласта он об этом не узнает. Потеря циркуляции жидкости для ожидания выравнивания тампонажной смеси приводит к дополнительным рискам при последующем ее восстановлении.

Управление процессами, происходящими при цементировании обсадных колонн, требует технического решения, позволяющего стабилизировать линейную скорость потока жидкостей. Предполагаемое решение должно обладать устойчивостью в работе, необходимой степенью регулирования, обеспечивать надежный контроль процесса и в конечном итоге приводить к повышению качества цементирования колонны. Реализовать поставленную задачу возможно с помощью автоматизированной системы управления скоростью жидкости в колонне (АСУ СЖК). Любая автоматизированная система управления (рис. 2) содержит следующие параметры: уставку $g(t)$, фактическое значение управляемой величины $x(t)$, отклонение $\xi(t)$, возмущающее воздействие $f(t)$ и управляющее воздействие $u(t)$. Основная задача автоматизированной системы управления — получая по цепи обратной связи фактическое значение управляемой величины $x(t)$, реагировать на отклонение $\xi(t)$, стремясь его уменьшить [4].



Рис. 2. Функциональная схема автоматизированной системы управления

Рассмотрим АСУ СЖК применительно к технологическому процессу цементирования обсадных колонн (рис. 3). В определенный момент времени под действием «отрывного» течения тампонажная смесь устремляется на забой скважины, формируя тем самым возмущающее воздействие $f(t)$. В результате «отрывного» течения в колонне происходит вакуумирование пространства, которое приводит к падению давления на входе в скважину. С этого момента необходимо предпринять определенные действия, которые привели бы к выравниванию давления на входе в скважину, то есть необходимо создать противодействие $P_{\text{уп}}$, препятствующее «отрывному» течению. Исходя из сказанного следует, что для АСУ СЖК уставкой $g(t)$ будет давление на входе в скважину $P_{\text{вх}}$, управляемой величиной $x(t)$ следует считать давление на выходе из скважины $P_{\text{вых}}$. За возмущающее воздействие $f(t)$ следует принять «отрывное» течение, возникающее при поступлении тампонажной смеси в колонну, отклонение $\xi(t)$ пропорционально линейной скорости «отрывного» течения. Основная задача АСУ СЖК заключается в формировании с помощью УУ управляющего воздействия $u(t)$, обеспечивающего уменьшение отклонения $\xi(t)$ до минимального.

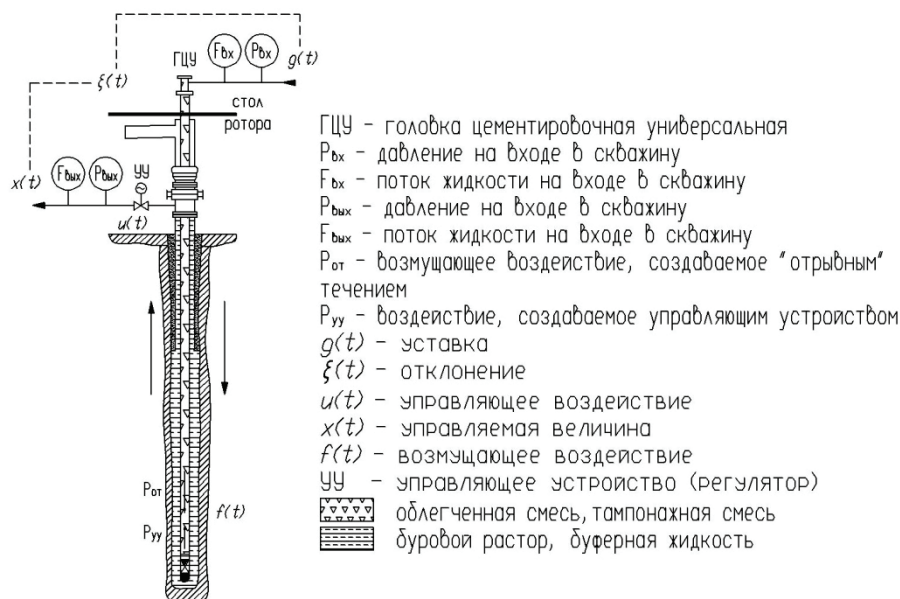


Рис. 3. Функциональная схема АСУ СЖК

Расчет управляющего воздействия должен обеспечивать высокое быстродействие и отсутствие статической ошибки, поэтому целесообразно воспользоваться пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования (ПИД регулятор) [5], который описывается уравнением

$$u(t) = K_r \xi(t) + \frac{K_r}{T_u} \int_0^t \xi(t) dt + K_r T_d \frac{d\xi(t)}{dt}, \quad (4)$$

где K_r — коэффициент пропорциональности; T_u — постоянная интегрирования; T_d — постоянная дифференцирования.

При этом пропорциональная составляющая $K_r \xi(t)$ обеспечивает реакцию на текущее отклонение, дифференциальная составляющая $\frac{K_r}{T_u} \int_0^t \xi(t) dt$ реагирует на тенденцию изменения отклонения, а интегральная составляющая $K_r T_d \frac{d\xi(t)}{dt}$ накапливая предыдущие отклонения, сглаживает высокочастотные шумы.

Формирование управляющего воздействия для рассматриваемой задачи возможно с помощью регулируемого дросселя, уменьшая его гидравлическое сечение, чем меньше проходное сечение дросселя, тем больше противодействие «отрывному» течению. Однако превышение противодействия над давлением гидро-разрыва пласта недопустимо, поэтому конструкторские решения управляющего устройства УУ должны обеспечивать выполнение указанного условия. В задачу АСУ СЖК также должен входить контроль баланса жидкости на входе в скважину и на ее выходе, который осуществляется расходомерами $F_{вх}$ и $F_{вых}$ соответственно. В случае поглощения при цементировании колонны система должна перейти на алгоритм противоаварийных действий, включающий в себя формирование управляющего воздействия в УУ и формирование диагностических сообщений оператору системы.

Реализация АСУ СЖК требует разработки программного обеспечения, позволяющего осуществлять поставленные выше задачи, в том числе регистрацию данных по давлению и потоку жидкости на входе и выходе скважины, расчету управляющего воздействия для УУ по закону ПИД регулятора, контролю баланса пото-

ка жидкости на входе и выходе скважины. Разработка программно-аппаратного комплекса АСУ СЖК должна осуществляться на базе типовых решений промышленной автоматизации и не должна содержать технически сложных элементов управления. АСУ СЖК должна комплектоваться оборудованием отечественных производителей.

Список литературы

1. Соловьев Е. М. Задачник по заканчиванию скважин: учеб. пособие для вузов. – М: Недра, 1989. – 251с.
2. Осипов П. Ф. Гидроаэромеханика бурения и крепления скважин: учебное пособие. – Ухта: УГТУ, 2004. – 204 с.
3. Лихущин А. М. Гидродинамические методы предупреждения осложнений при бурении и цементировании скважин в неустойчивых породах: автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – Москва, 2012.
4. Дядик В. Ф. Теория автоматического управления: учебное пособие. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2011. – 196 с.
5. Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления: учебное пособие. – Тамбов: ТГТУ, 2004. – 352 с.

Сведения об авторах

Кузнецов Владимир Григорьевич, д. т. н., профессор кафедры «Бурение нефтяных и газовых скважин», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)390393, e-mail: burenie@rambler.ru

Макаров Олег Анатольевич, магистрант по направлению «Бурение горизонтальных скважин», Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: OlegMtyumen@gmail.com

Information about the authors

Kuznetsov V. G., Doctor of Engineering, professor of Oil and Gas Wells Drilling Department, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)390393, e-mail: burenie@rambler.ru

Makarov O. A., Master student in the field of Drilling of Horizontal Wells, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)390393, e-mail: OlegMtyumen@gmail.com