

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ КОНТРОЛЯ ПРИМЕСЕЙ ВОДЫ И ПЕСКА В ПРОДУКЦИИ ГАЗОВЫХ И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ СКВАЖИН

IMPROVEMENT OF MEASURING CONVERTERS FOR CONTROL OF WATER AND SAND INCLUSIONS IN THE GAS AND GAS CONDENSATE WELL PRODUCT FLOW

**O. Yermolkin
Ya. Popova
I. Khrabrov
M. Gavshin**

Summary. The article is dedicated to the improvement of measuring converters for the control of impurities of water and sand in the production of gas and gas condensate wells used in the information and measuring systems of «Potok» («Flow») series. New unified information models of channels for the registration of inclusions, convenient for practical use, are proposed and investigated.

Keywords: multiphase flows, spectral flow measuring method, inclusions flow of water and sand, measuring converters.

Ермолкин Олег Викторович

Д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
ove@gubkin.ru

Попова Янина Дмитриевна

Аспирант, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина,
yanina.zykova@yandex.ru

Храбров Игорь Юрьевич

К.т.н., доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
khrabrov@gubkin.ru

Гавшин Михаил Александрович

Ведущий инженер, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина
gavshin@gubkin.ru

Аннотация. Статья посвящена совершенствованию измерительных преобразователей контроля примесей воды и песка в продукции газовых и газоконденсатных скважин, применяемых в составе информационно-измерительных систем серии «Поток». Предложены и исследованы новые унифицированные информационные модели каналов регистрации примесей, удобные для практического применения.

Ключевые слова: многофазные потоки, спектрометрический метод измерения расхода фаз, расход примесей воды и песка, измерительные преобразователи.

Вступление

Продукция подавляющего большинства газовых и газоконденсатных скважин, обеспечивающих основной объём добычи газа в России, представляет многофазный поток со сложной структурой, в котором помимо газовой фазы содержатся примеси воды и песка [1]. В таких условиях наряду с измерением дебита основной продукции возникает задача контроля количества примесей. Информация о количестве примесей в потоке продукции при различных режимах по дебиту является ключевой для своевременного обнаружения аварийного выноса примесей и принятия решений по изменению режима эксплуатации скважин.

Измерительный преобразователь информационных сигналов каналов регистрации примесей песка и воды

Для контроля и оценки количества примесей воды и песка в многофазном потоке скважин разработана оригинальная двухканальная схема вторичного измерительного преобразователя информационных сигналов (рис. 1) [2]. Обработке подвергаются сигналы ударного воздействия капель жидкости и частиц песка, регистрируемые первичным измерительным преобразователем с пьезокерамическим чувствительным элементом.

Разработанный вторичный измерительный преобразователь включает в себя два информационных канала с различными схемами обработки сигналов. Так, в канале регистрации удельного содержания примесей воды (УСПВ) для оценки количества примесей воды вычисляется среднееквадратическое значение сигнала ударного воздействия капель жидкости в соответствующей информативной полосе частот в ультразвуковом диапазоне. А для получения информации о количестве при-

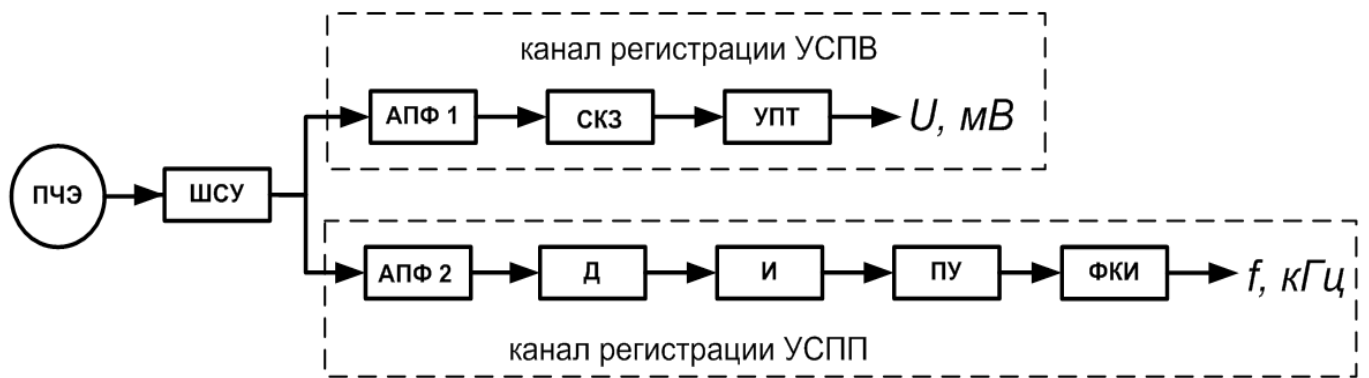


Рис. 1. Функциональная схема измерительного преобразователя информационных сигналов каналов регистрации примесей

месей песка в канале регистрации удельного содержания примесей песка (УСПП) используется специальный функциональный преобразователь, позволяющий формировать на выходе информационного канала пачки импульсов, количество которых пропорционально интенсивности сигнала отдельного ударного воздействия. Средняя частота импульсной последовательности пропорциональна общей интенсивности ударов песчинок за время измерения.

ПЧЭ — пьезокерамический чувствительный элемент; ШСУ — широкополосный согласующий усилитель; АПФ1, АПФ2 — активные полосовые фильтры; СКЗ — вычислитель среднеквадратического значения сигнала; УПТ — усилитель постоянного тока; Д — детектор; И — интегратор; ПУ — пороговое устройство; ФКИ — формирователь квантованных импульсов.

В работе [3] приведены временные диаграммы, иллюстрирующие процедуру формирования информационного сигнала канала регистрации УСПП. Предложенный подход позволил не только регистрировать факт соударения песчинок о выступающую в многофазный поток часть датчика, но и учитывать параметры ударного воздействия (массу песчинок и скоростные характеристики потока), что существенно улучшает точность измерения количества примесей песка.

Работы [4,5] посвящены разработке и исследованию информационных моделей, функционально связывающих количество примесей песка и воды в газовом потоке продукции с соответствующими выходными сигналами разработанного измерительного преобразователя. В настоящей статье приводятся результаты исследований, направленные на разработку и исследование новых унифицированных информационных моделей удельного содержания примесей.

В обобщённом виде информационные модели каналов регистрации УСПВ (модель 1) и УСПП (модель 2) можно представить следующим образом:

$$f = \varphi_1(Q_G, S_B, d) + \varepsilon_1 \tag{1}$$

$$и U = \varphi_2(Q_G, S_B, d) + \varepsilon_2, \tag{2}$$

где Q_G — дебит газа; S_B — удельное содержание примесей воды, которое определяется, как отношение Q_B / Q_G , где Q_B — расход примесей воды; $S_{П}$ — удельное содержание примесей песка, которое определяется, как отношение $Q_{П} / Q_G$, где $Q_{П}$ — расход примесей песка; d — диаметр сужающего устройства; f — частота сигнала на выходе канала регистрации УСПП; U — среднеквадратическое значение напряжения на выходе канала регистрации УСПВ; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — аддитивные помехи, учитывающие случайные ошибки измерений, шумы, влияние неучтенных факторов.

Экспериментальные исследования моделей (1) и (2) выполнены на специальной лабораторной установке, позволяющей создавать водо-воздушные и песко-воздушные потоки с заданными расходами воздуха и примесей [5]. Для исследований были задействованы опытные образцы промышленных датчиков, включающих первичный преобразователь и преобразователи расходных информационных каналов. Эти датчики получили название скважинных измерительных модулей (СИМ).

В результате исследования информационных моделей каналов регистрации примесей (1) и (2) удалось получить обратные модели (информационные модели расхода), связывающие концентрацию примесей с выходными сигналами информационных каналов и расходом газа. В работе [4] подробно изложены алгоритмы построения информационных моделей расхода приме-

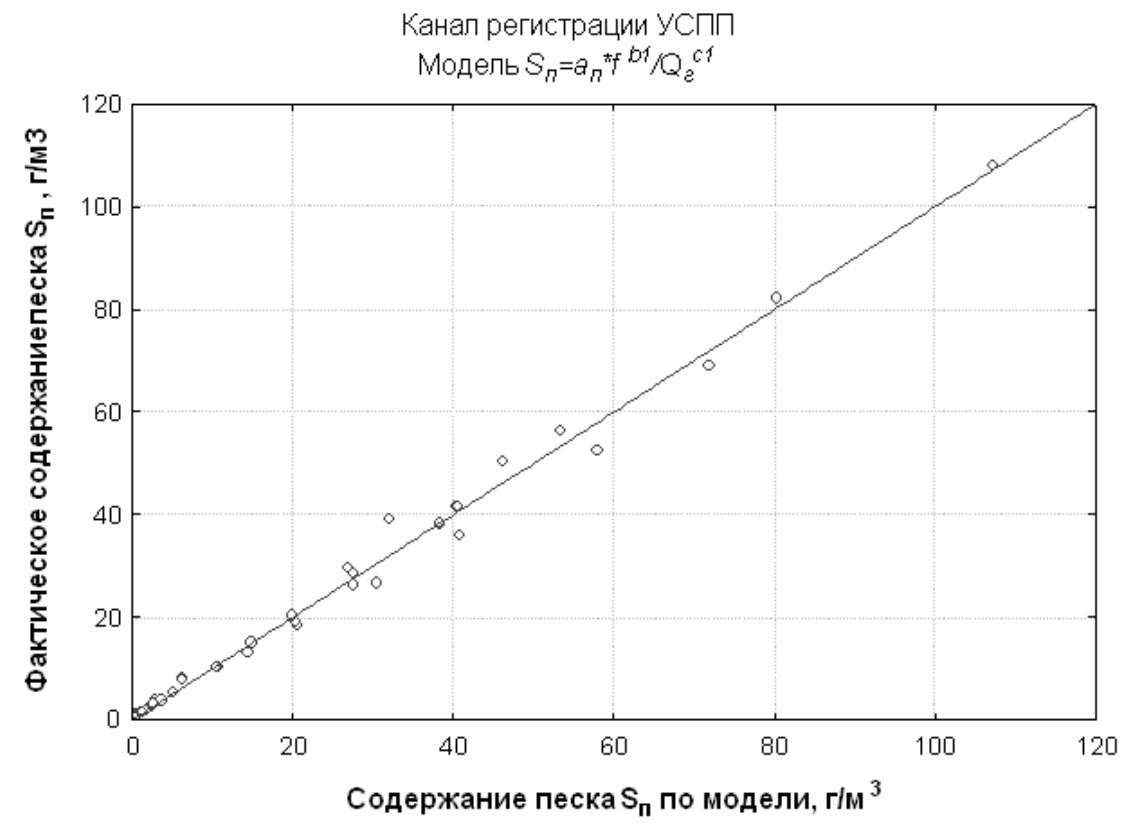


Рис. 2. Зависимость фактического содержания песка от содержания песка, рассчитанного по модели (3)

сей. Для канала регистрации УСПП определена модель следующего вида:

$$S_n = a_n * f^{b_1} / Q_{\Gamma}^{c_1}, \quad (3)$$

а для канала регистрации УСПВ модель вида:

$$S_{\varepsilon} = a_{\varepsilon} * U^{b_2} / Q_{\Gamma}^{c_2}, \quad (4)$$

где $a_n, a_{\varepsilon}, b_1, b_2, c_1$ и c_2 — постоянные коэффициенты моделей.

Для полученных моделей (3) и (4) выполнена проверка адекватности, в ходе которой сравнивалась дисперсия адекватности с дисперсией воспроизводимости с помощью критерия Фишера. Результаты проверки оказались положительными при 5% уровне значимости.

Разработка унифицированной модели расхода удельного содержания примесей песка

Результаты применения модели (3) для одного из СИМ отражены на рис. 2, где построены зависимости реальных содержаний песка, измеренных в ходе прове-

дения эксперимента, от содержаний песка, рассчитанных по регрессионной модели.

Как видно из рисунка, наблюдается хорошая сходимость расчетных значений удельных содержаний примесей с заданными в ходе эксперимента. Учитывая немалый объем экспериментальных данных и широкий диапазон их изменения, можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов и работоспособности регрессионных моделей.

Предложенная модель (3) была исследована и для других идентичных образцов СИМ, и получены графики зависимостей, аналогичные графику, представленному на рис. 2. Ниже в табл. 1 приведены результаты расчета регрессионных коэффициентов a_1, b_1 и c_1 модели (3) для десяти СИМ, а так же соответствующих коэффициентов множественной корреляции R , вычисленных по формуле:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

где y_i — фактическое значение; \hat{y}_i — значение, вычисленное по модели; \bar{y} — среднее фактических значений; n — количество измерений.

Таблица 1. Результаты расчета неизвестных коэффициентов регрессионной модели (3) и коэффициентов R

№ СИМ	Коэффициенты регрессионной модели			R
	a_1	b_1	c_1	
1	0,77	1,15	2,302	0,9964
2	1,02	1,12	2,32	0,9958
3	0,82	1,13	2,27	0,9967
4	0,43	1,16	2,14	0,9974
5	1,12	1,15	2,43	0,9945
6	0,95	1,12	2,32	0,9949
7	1,05	1,103	2,29	0,9961
8	1,98	1,08	2,43	0,9940
9	0,33	1,18	2,1	0,9988
10	1,00	1,12	2,39	0,9955

Таблица 2. Результаты расчета коэффициентов множественной корреляции R для модели (3) при $b_1=1$

№ СИМ Коеф-т c_1	Коэффициенты множественной корреляции R									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0,9921	0,9908	0,9932	0,9948	0,9862	0,9899	0,9916	0,9828	0,9955	0,9879
2,1	0,9939	0,9935	0,9948	0,9937	0,9901	0,9926	0,9943	0,9883	0,9933	0,9918
2,15	0,9941	0,9940	0,9948	0,9924	0,9913	0,9932	0,9948	0,9903	0,9916	0,9930
2,2	0,9937	0,9941	0,9944	0,9908	0,9921	0,9933	0,9949	0,9918	0,9894	0,9937
2,25	0,9930	0,9937	0,9935	0,9887	0,9923	0,9929	0,9945	0,9928	0,9869	0,9939
2,3	0,9918	0,9929	0,9922	0,9863	0,9921	0,9921	0,9937	0,9933	0,9840	0,9936
2,4	0,9881	0,9900	0,9884	0,9804	0,9904	0,9892	0,9908	0,9929	0,9772	0,9918

Таблица 3. Результаты расчета коэффициентов множественной корреляции R для модели (3) при $b_1=1,1$

№ СИМ Коеф-т c_1	Коэффициенты множественной корреляции R									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	0,9901	0,9871	0,9911	0,9964	0,9809	0,9864	0,9875	0,9737	0,9981	0,9953
2,1	0,9941	0,9921	0,9948	0,9970	0,9872	0,9913	0,9925	0,9819	0,9978	0,9823
2,15	0,9953	0,9938	0,9959	0,9966	0,9896	0,9930	0,9941	0,9852	0,9968	0,9887
2,2	0,9959	0,9949	0,9965	0,9958	0,9915	0,9941	0,9953	0,9879	0,9954	0,9911
2,25	0,9961	0,9956	0,9965	0,9945	0,9929	0,9947	0,9959	0,9901	0,9936	0,9929
2,3	0,9959	0,9958	0,9962	0,9928	0,9938	0,9949	0,9961	0,9918	0,9914	0,9942
2,4	0,9940	0,9948	0,9941	0,9882	0,9942	0,9938	0,9950	0,9937	0,9858	0,9951

Величина

$$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

представляет собой «необъяснённую» дисперсию, т.е. долю общей дисперсии, которая не объясняется функцией регрессии, а возникает за счёт изменчивости неучтенных факторов или за счет случайностей.

Как видно из табл. 1, коэффициенты множественной корреляции R для всех исследованных СИМ превышают величину 0,99, что свидетельствует о том, что выбран-

ная модель достаточно хорошо описывает экспериментальные данные. Кроме того, можно отметить, что коэффициенты b_1 для всех СИМ отличаются незначительно, а также коэффициенты c_1 для всех СИМ отличаются незначительно. Поэтому их можно зафиксировать, оставив в модели (3) только один коэффициент a_1 . Это позволит существенно упростить процедуру градуировки канала регистрации УСПП по месту эксплуатации.

Целесообразно для исследований зафиксировать следующие значения коэффициентов b_1 и c_1 : $b_1=1; 1,1$ и $c_1=2; 2,15; 2,2; 2,25; 2,3; 2,4$. Для выбранных значе-

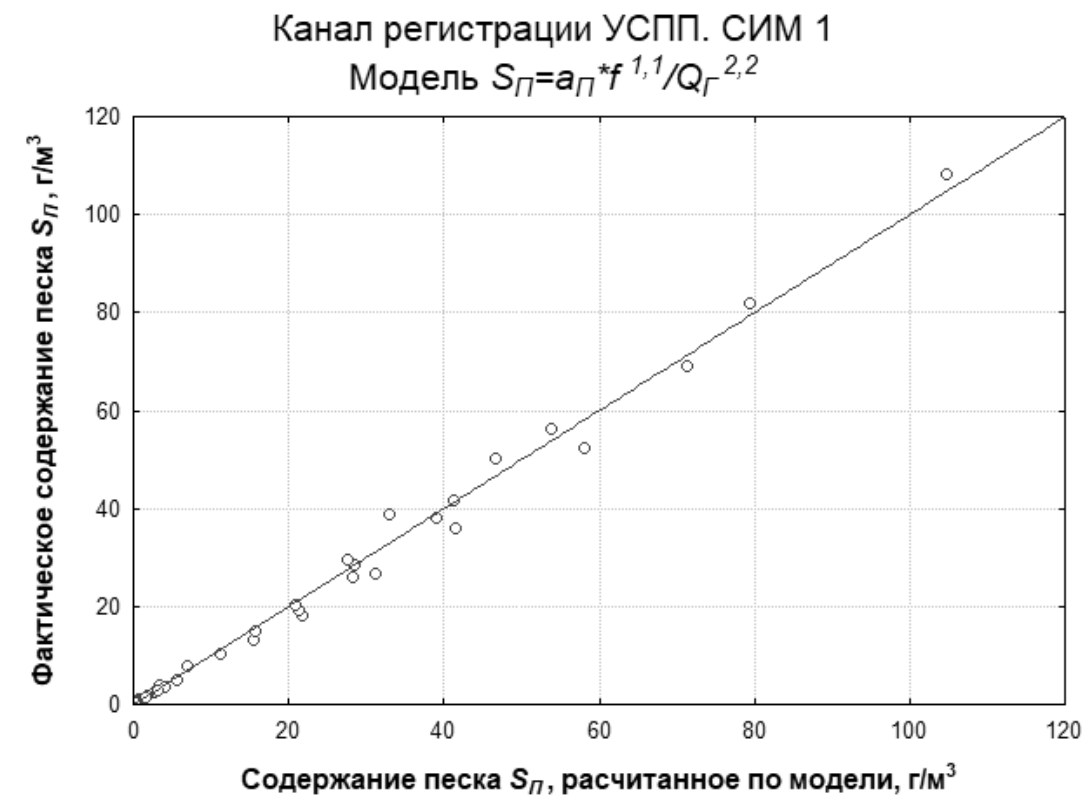


Рис. 3. Зависимость фактического содержания песка от содержания песка, рассчитанного по унифицированной модели (5)

ний коэффициентов регрессионной модели были рассчитаны соответствующие коэффициенты множественной корреляции R (табл. 2 и 3).

Анализируя полученные значения коэффициентов множественной корреляции R , отвечающие различным значениям коэффициентов регрессионной модели (3), унифицированную информационную модель расхода песка, содержащую всего один градуировочный коэффициент, целесообразно определить так:

$$S_{п} = a_{п} * f^{1,1} / Q_{г}^{2,2} \quad (5)$$

Пример применения унифицированной модели для одного из СИМ приведен на рис. 3. Видно, что достигнута хорошая сходимость экспериментальных и рассчитанных по унифицированной модели значений.

Для оценки точности модели (5) рассчитаны и приведены в табл. 4 приведённые среднеквадратические погрешности γ_{σ} вычисления удельного содержания примесей песка для всех десяти исследуемых СИМ:

$$\gamma_{\sigma} = \frac{\sigma}{S_{п \text{ факт } MAX}} * 100\% \quad (6)$$

где: σ — среднеквадратическое отклонение результатов измерения содержания песка, рассчитываемое по формуле (7),

$S_{п \text{ факт } MAX}$ — максимальное значение фактического содержания песка.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_{п \text{ факт } i} - S_{п \text{ мод } i})^2}{n-1}} \quad (7)$$

$S_{п \text{ факт } i}$ — фактическое содержание песка, измеренное в ходе i -го опыта,

$S_{п \text{ мод } i}$ — содержание песка, рассчитанное по модели (5) и соответствующее условиям i -го опыта,

n — количество опытов ($n=36$), i — номер проводимого опыта.

Учитывая немалый объём экспериментальных точек, представительную выборку измерительных преобразователей (десять СИМ), а также широкий динамический диапазон изменения параметров, можно заключить о достижении хороших результатов. Приведённые сред-

Таблица 4. Приведённые среднеквадратические погрешности γ_σ вычисления удельного содержания примесей песка для контрольной партии СИМ,%

№ СИМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ_σ	2,19	2,45	2,05	2,24	3,16	2,63	2,36	3,79	2,33	2,89

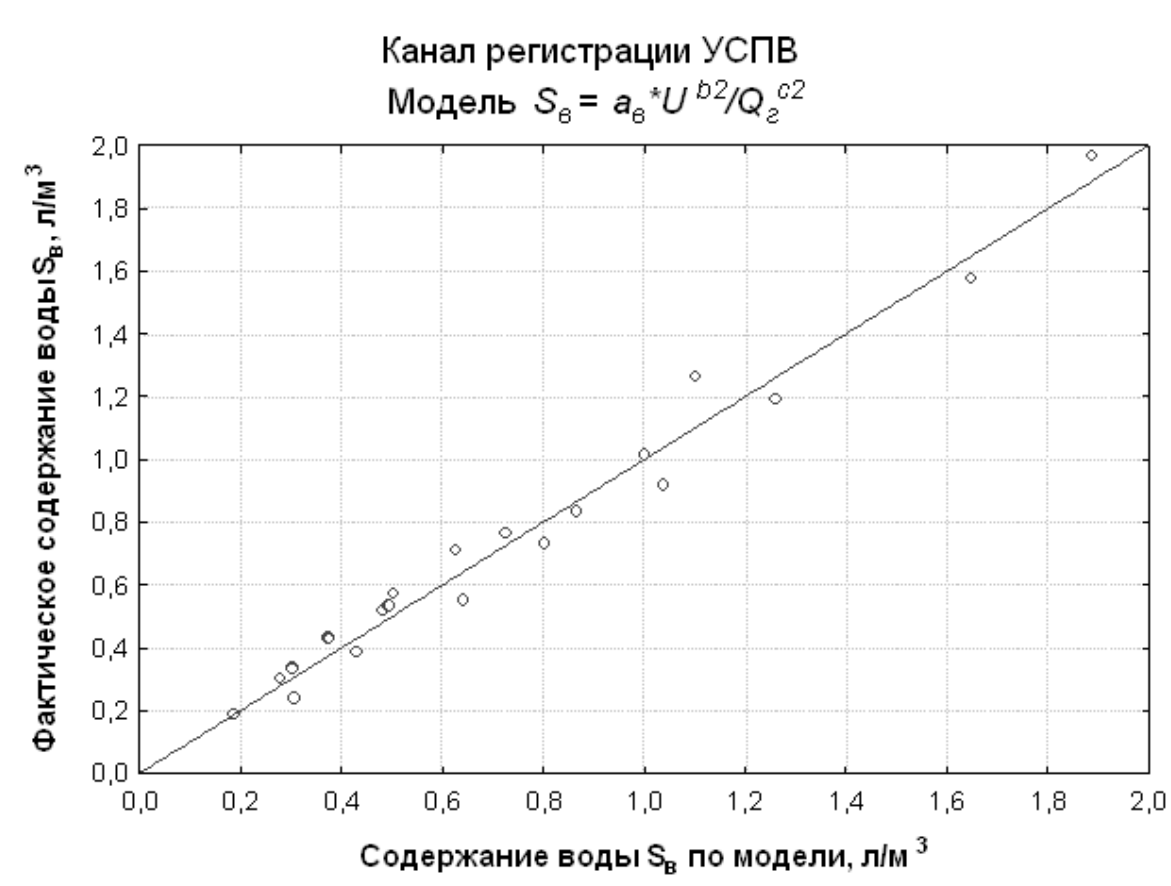


Рис. 4. Зависимость фактического содержания примесей воды от содержания воды, рассчитанного по модели (4)

неквадратические погрешности вычисления удельного содержания примесей песка для выбранных СИМ составили от 2,05% до 3,79% (в динамическом диапазоне концентраций песка от 0,005 до 110 г/м³). Это вполне удовлетворяет требованиям технологического контроля режима работы скважин.

Разработка унифицированной модели канала регистрации удельного содержания примесей воды

Результаты применения модели (4) для одного из СИМ отражены на рис. 4, где построена зависимость реального содержания примесей воды, измеренного

в ходе проведения эксперимента, от содержания примесей воды, рассчитанного по выбранной регрессионной модели.

Здесь также наблюдается хорошая сходимость экспериментальных и рассчитанных по модели значений в широком диапазоне изменения параметров. Разброс точек на графиках зависимостей, построенных для остальных исследуемых СИМ, аналогичен наблюдаемому на рис. 4.

В табл. 5 приведены результаты расчета регрессионных коэффициентов a_B , b_2 и c_2 модели (4) для десяти образцов идентичных СИМ. Коэффициенты множественной корреляции для всех исследованных СИМ превыша-

Таблица 5. Результаты расчета неизвестных коэффициентов регрессионной модели (4)

№ СИМ	Коэффициенты регрессионной модели			Коэф-т R
	a_B	b_2	c_2	
1	494,82	2,24	7,50	0,9879
2	551,85	2,24	7,51	0,9899
3	707,37	2,24	7,55	0,9687
4	907,48	2,01	7,15	0,9822
5	601,52	2,10	7,21	0,9895
6	1105,93	2,10	7,43	0,9850
7	835,11	2,09	7,31	0,9886
8	1084,69	2,42	8,07	0,9699
9	923,04	2,18	7,50	0,9860
10	509,2354	2,10	7,13	0,9874

Таблица 6. Результаты расчета коэффициентов множественной корреляции R для модели (4) при $b_2=2,1$

№ СИМ Коэф-т c_2	Коэффициенты множественной корреляции R									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,5	0,8993	0,8980	0,8502	0,7648	0,8596	0,7553	0,8053	0,8470	0,8370	0,8790
7	0,9858	0,9867	0,9624	0,9399	0,9799	0,9419	0,9619	0,9615	0,9696	0,9825
7,5	0,9509	0,9587	0,9426	0,9809	0,9713	0,9839	0,9833	0,9380	0,9750	0,9621
8	0,8392	0,8553	0,8382	0,9249	0,8773	0,9250	0,9111	0,8278	0,8931	0,8608

Таблица 7. Результаты расчета коэффициентов множественной корреляции R для модели (4) при $b_2=2,2$

№ СИМ Коэф-т c_2	Коэффициенты множественной корреляции R									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6,5	0,7754	0,7774	0,7034	0,5625	0,7076	0,5328	0,6216	0,6940	0,6784	0,7409
7	0,9540	0,9531	0,9172	0,8491	0,9269	0,8464	0,8861	0,9170	0,9088	0,9388
7,5	0,9840	0,9874	0,9679	0,9681	0,9891	0,9719	0,9837	0,9672	0,9851	0,9862
8	0,9118	0,9229	0,9068	0,9678	0,9405	0,9709	0,9631	0,9012	0,9505	0,9276

Таблица 8. Приведённые среднеквадратические погрешности γ_σ вычисления удельного содержания примесей воды для контрольной партии СИМ, %

№ СИМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ_σ	4,21	3,73	5,93	5,91	3,47	6,72	4,24	5,99	4,06	3,91

ют величину 0,96, что также свидетельствует об удачном выборе модели (4). Кроме того, анализируя численные значения коэффициентов b_2 и c_2 модели (4) для всех рассмотренных СИМ, можно заключить, что их целесообразно зафиксировать.

Для исследований предложено выбрать следующие фиксированные значения коэффициентов b_2 и c_2 : $b_2=2,1$; $2,2$ и $c_2=6,5$; 7 ; $7,5$; 8 . Соответствующие этим значениям коэффициентов b_2 и c_2 коэффициенты множественной корреляции R для модели (4) приведены в таблицах 6 и 7.

На основе анализа расчетных значений R (табл. 6 и 7) можно предложить следующий вид унифицированной модели удельного расхода воды:

$$S_B = a_B * U^{2,2} / Q_T^{7,5} \quad (8)$$

Пример применения унифицированной модели (8) для одного из СИМ приведен на рис. 5. Приведенная среднеквадратическая погрешность γ_σ составила 4,21% при изменении заданных значений водосодержаний в диапазоне от 0,2 л/м3 до 2 л/м3.

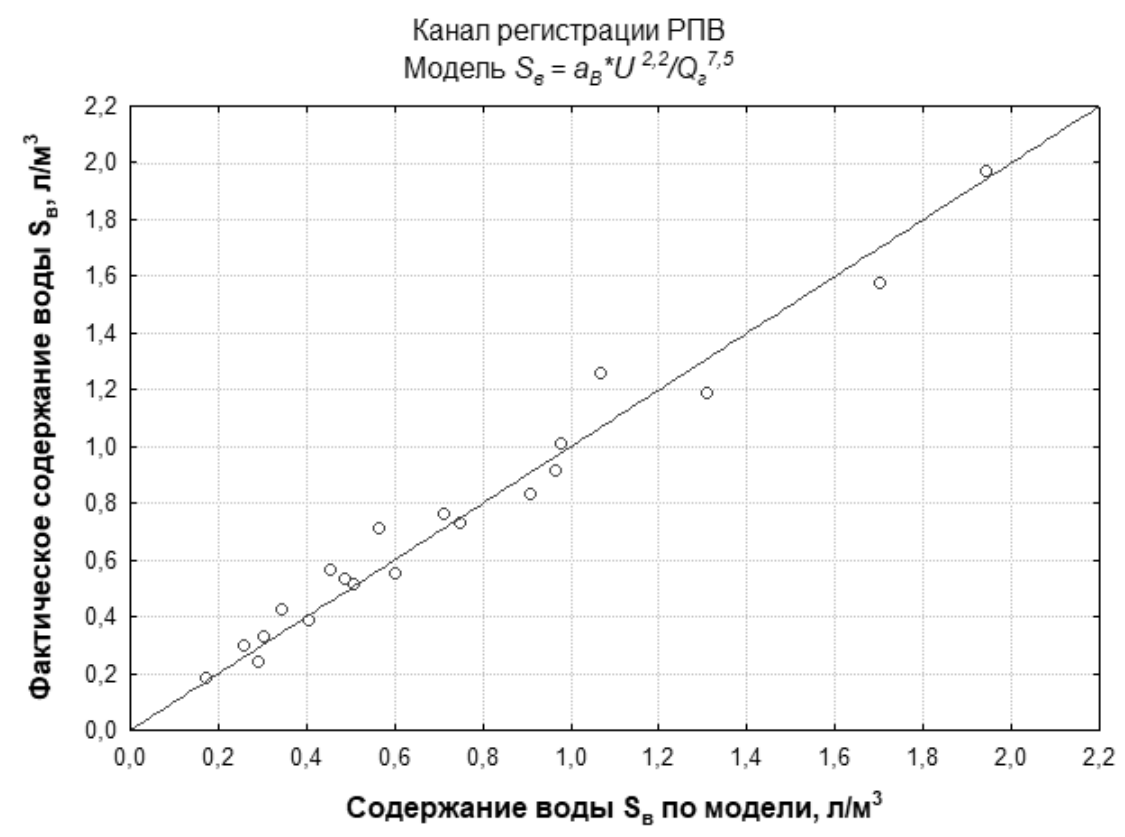


Рис. 5. Зависимость фактического содержания воды от содержания воды, рассчитанного по модели (8) для СИМ № 1

Аналогичные результаты получены при исследовании партии из десяти СИМ. Результаты расчета среднеквадратической погрешности γ_σ для этих СИМ сведены в таблицу 8.

Учитывая немалый объем экспериментальных точек, представительную выборку измерительных преобразователей (десять СИМ), а также широкий динамический диапазон изменения параметров, можно заключить о достижении хороших результатов, удовлетворяющих требованиям технологического контроля режима работы скважин.

Выводы

Результаты обработки большого объема экспериментальных данных, полученных в ходе проведения лабора-

торных исследований подтверждают перспективность предложенных алгоритмов обработки выходного сигнала усовершенствованного измерительного преобразователя для решения задач регистрации количества примесей воды и песка в потоке газа.

Получены удобные для практического применения унифицированные информационные модели расхода примесей песка и воды, содержащие всего один градуировочный коэффициент. Это позволяет упростить процедуру градуировки датчика по месту эксплуатации.

Проведенные исследования унифицированных моделей для десяти различных СИМ позволяют говорить о достижении точности вычисления содержания примесей, удовлетворяющей требованиям технологического контроля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вяхирев Р.И., Гриценко А. И., Тер-Саркисов Р. М. Разработка и эксплуатация газовых месторождений. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. — 880 с.
2. Ермолкин О.В., Попова Я. Д., Горохов А. В. Разработка и исследование электронных преобразователей каналов регистрации примесей в потоке продукции газовых и газоконденсатных скважин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2018. № 3. С. 18–23.

3. Ермолкин О.В., Великанов Д. Н., Попова Я. Д., Храбров И. Ю. Контроль параметров сложных потоков продукции эксплуатационных скважин измерительной системой «Поток» нового поколения // Труды РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2018. № 3/288. С. 195–207.
4. Ермолкин О.В., Великанов Д. Н., Гавшин М. А., Попова Я. Д. Комплексный контроль параметров продукции эксплуатационных скважин // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 4. С. 12–20.
5. Попова Я. Д. Разработка и исследование информационных моделей расхода примесей в потоке продукции газовых и газоконденсатных скважин // Нефть, газ, бизнес. 2017. № 11. С. 9–16.
6. Браго Е.Н., Ермолкин О. В., Ланчаков Г. А., Великанов Д. Н., Гавшин М. А. Совершенствование информационно-измерительных технологий в нефтегазодобыче // Труды РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2012. № 3. С. 24–42.

© Ермолкин Олег Викторович (ove@gubkin.ru), Попова Янина Дмитриевна (yanina.zykova@yandex.ru),
Храбров Игорь Юрьевич (khrabrov@gubkin.ru), Гавшин Михаил Александрович (gavshin@gubkin.ru).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»