

# Проектирование и испытания систем заканчивания скважин для решения задач контроля и регулирования притока

**Д.А. Семикин**

начальник отдела геологии по совместным проектам<sup>1</sup>  
dsemik@yandex.ru

**М.Т. Нухаев**

к.т.н., доцент<sup>2</sup>  
mnukhaev@hotmail.com

**А.В. Жаковщikov**

ведущий инженер<sup>3</sup>  
azhakovschikov@gmail.com

<sup>1</sup>ООО «РН-Эксплорейшн», Москва, Россия

<sup>2</sup>Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия

<sup>3</sup>ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть», Астрахань, Россия

**Данная статья посвящена опыту ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть» по проектированию, моделированию и испытаниям новой системы заканчивания скважин для решения задач управления притоком углеводородов в горизонтальную скважину при разработке контактных запасов.**

## Материалы и методы

Работа включает в себя обсуждение требований к новому устройству, создание экспериментального стенда в лаборатории и проведение предварительной оценки жизнеспособности идеи. Следующим шагом стало численное моделирование для уточнений особенностей конструкции, подбор наилучшей конструкции. Завершающим этапом создания нового оборудования заканчивания стало изготовление полноразмерного образца и испытаний его гидравлических характеристик на промышленном испытательном стенде.

## Ключевые слова

адаптивная система регулирования притока, клапан прямого действия, экспериментальный стенд, расход, перепад давления

ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть» совместно с производителем оборудования — заводом ОАО «Тяжпрессмаш», Московским Государственным Техническим Университетом имени Н.Э. Баумана, Сибирским Федеральным Университетом и ООО «Вормхолс» провели НИОКР по разработке Адаптивной Системы Регулирования Притока (АСРП). Данная система располагается в скважине, в продуктивной горизонтальной части ствола, и должна самонастраиваться в зависимости от скорости и давления флюида и его фазового состава. Регулирование притока достигается конструкцией специальных клапанов и величиной расхода через них (рис. 1), что обеспечивает расчетный перепад давления срабатывания клапанов на их открытие или закрытие для заданного расхода потока. Другими словами, АСРП должна позволять ограничивать максимальный расход через каждую секцию на определенном уровне вне зависимости от перепада давления. Таким образом, АСРП теоретически дает возможность не только выравнивать профиль притока и откладывать на более поздний срок время начала прорыва газа в скважину, но и ограничивать расход газовой фазы на заданном уровне в зоне прорыва (по причине снижения вязкости продуктивность интервалов прорыва газа резко возрастает), позволяя скважине работать еще долгое время без значительного увеличения газового фактора [1].

АСРП состоит из нескольких наборов дроссельных колец для создания определенного сопротивления потоку и двухпозиционных клапанов, расположенных между ними (рис. 1). При превышении заданного расхода первый в последовательности клапан перекрывается, и поток флюида должен пройти через дополнительный набор дроссельных колец. Соответственно, увеличиваются потери давления в этой секции, и снижается рабочая депрессия на продуктивный интервал. Если приток флюида еще достаточно интенсивен, то перекрывается следующий в последовательности клапан и депрессия снижается до необходимого уровня. Таким образом, система предназначена для ограничения массового расхода с каждой секции на определенном

участке горизонтальной скважины, вне зависимости от депрессии на пласт [2].

При проектировании АСРП основным вопросом являлся подбор систем регулирования под ограниченные размеры систем заканчивания. После ряда экспериментов было решено остановиться на устройстве на основе клапанов с постоянным магнитом, которое позволяет вписать данную установку в заданные габаритные размеры [3]. Основным элементом данной системы является нормально открытый двухпозиционный клапан прямого действия со сферическим запорным элементом с постоянным магнитом. Клапан состоит из двух основных элементов: крышки 1 и седла 2 (рис. 2а) Шарик из магнитного материала 3 служит запорным элементом. Под действием коэрцитивных сил постоянных магнитов 4 (рис. 2б), вставленных в крышку клапана, запорный элемент прижимается к крышке клапана.

При расходе жидкости и/или газа через АСРП меньше номинального, запорный элемент (затвор) магнитного клапана открыт и удерживается в фиксированном положении коэрцитивной силой постоянного магнита. При увеличении расхода жидкости выше номинального происходит срабатывание клапана, затвор закрывается и поток перенаправляется в дроссель, следующий за клапаном, тем самым увеличивая общее гидравлическое сопротивление системы, что в случае постоянного перепада давления между пластом и сборной трубой приводит к понижению расхода среды.

Для проведения работы был разработан экспериментальный стенд для лабораторных испытаний двухпозиционных клапанов с магнитами на газообразной рабочей среде (воздухе) (рис. 3). Экспериментальный стенд разработан с целью получения гидравлических характеристик расхода от перепада давления как для одного клапана, так и для системы, состоящей из трех параллельных клапанов. Параллельное соединение клапанов в данном случае позволяет более плавно регулировать расход в заданном диапазоне. В качестве дросселей в экспериментальной установке были использованы шаровые клапаны.

В ходе экспериментальных исследований была выявлена неравномерность срабатывания клапанов в зависимости от сопротивления дросселей магистралей. Данная неравномерность может быть причиной перераспределения расходов между отдельными участками системы. Установка дополнительных датчиков расходов и термомпар не позволяет с достаточной точностью определить изучаемые явления в экспериментальном стенде.

Для изучения работы системы с фиксированными сопротивлениями дросселей было предложено провести в поддержку экспериментального исследования численное моделирование всей экспериментальной установки с применением вычислительной

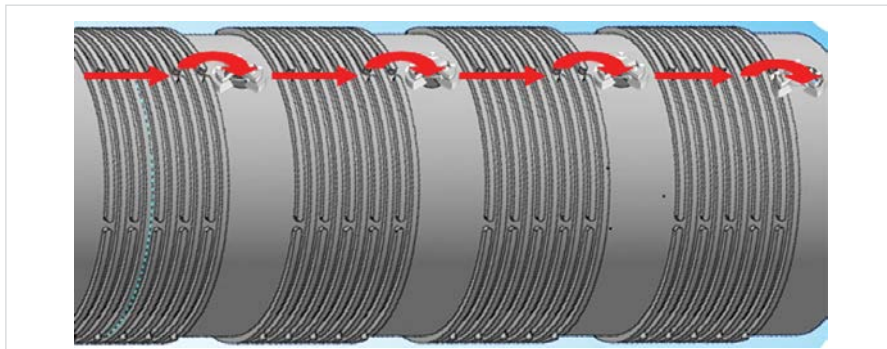


Рис. 1 — Схема Адаптивной Системы Регулирования Притока (АСРП)

аэро-гидродинамики (CFD — computational fluid dynamics). С помощью программного комплекса STAR-CCM+ разработана CFD модель стэнда, имитирующая его работу для одного положения гидравлических сопротивлений (дросселей) основной магистрали, учитывающая различные режимы работы с открытыми и закрытыми клапанами.

В общем случае постановка задачи включает в себя совокупность геометрической модели, физических свойств рабочей среды и математической модели с приложенными граничными условиями. На основе конструкции экспериментального стэнда была создана твердотельная модель его проточной части в графическом редакторе CATIA (рис. 4). Расчетная область была разделена на три характерных участка: основную магистраль с шаровыми кранами, имитирующими дроссели АСРП, рабочие участки с клапанами и байпасную магистраль.

Для построения сетки расчетной области использовался встроенный в STAR-CCM+ сеточный генератор многогранных ячеек. При применении многогранных ячеек, расчетная область разбивается на контрольные объемы сложной многогранной формы, приближенной к сфере. Данный тип ячеек является наиболее экономичным при автоматическом построении сетки расчетной области, а также наиболее выгодным с точки зрения вычислительной производительности [4].

В процессе проведения численных расчетов в соответствии с рекомендациями [5] расчетная сетка уточнялась и изменялась. Проводилось локальное сгущение расчетной сетки в области больших градиентов в элементах проточной части. На рис. 5а и 5б изображены расчетные сетки проточной части в области двухпозиционных клапанов АСРП до и после локального сгущения соответственно.

При моделировании процесса течения рабочей среды в экспериментальном стэнде принимались следующие допущения:

- рабочая среда (воздух) считается ньютоновской сжимаемой жидкостью;
- течение рабочей среды — стационарное;
- параметры рабочей среды подчиняются закону идеального газа;
- режим течения — турбулентный;
- течение рабочей среды — адиабатическое;
- вязкость, теплопроводность и теплоемкость среды — постоянны.

Ввиду чрезвычайной временной затратности методов, основанных на моделях крупных вихрей (LES) и прямом численном моделировании (DNS), они не подходят для оперативного анализа характеристик экспериментального стэнда. Учитывая этот факт, для обеспечения оперативности анализа необходимо использовать менее затратные подходы, основанные на уравнениях Навье-Стокса, осредненных по методу Рейнольдса.

Распределение расхода между участками и перепад давления на данных участках представлено в таб. 1. Как видно из анализа таблицы, через первый клапан течет только 25% расхода, а максимальный расход (41%) идет через прямой участок 4. Также стоит отметить, что при изменении сопротивлений шаровых клапанов основной магистрали, приведенное в таблице соотношение будет изменяться.

На рис. 6 представлено поле давления для различных режимов работы АСРП: при

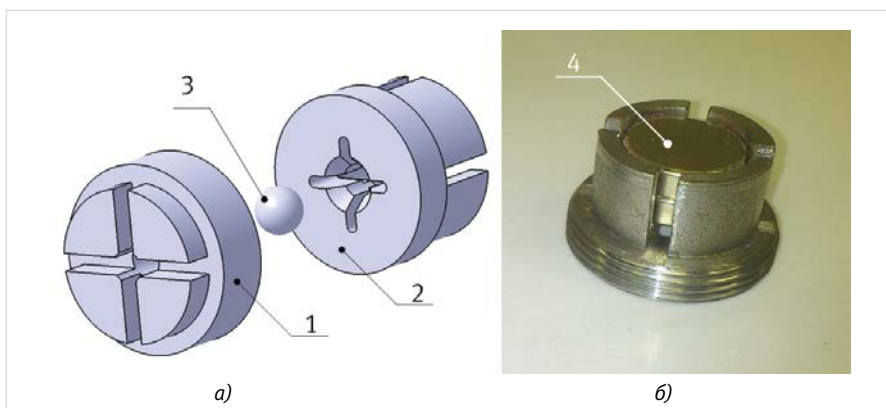


Рис. 2 — Устройство клапана: а) трехмерная модель клапана; б) крышка клапана с набором сменных магнитов

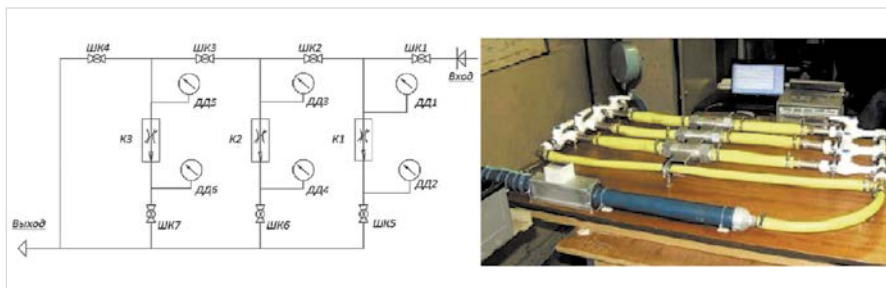


Рис. 3 — Пневматическая схема экспериментального стэнда: К1-3 — клапаны; ДД1-6 — датчики давления; ШК1-7 — шаровые краны

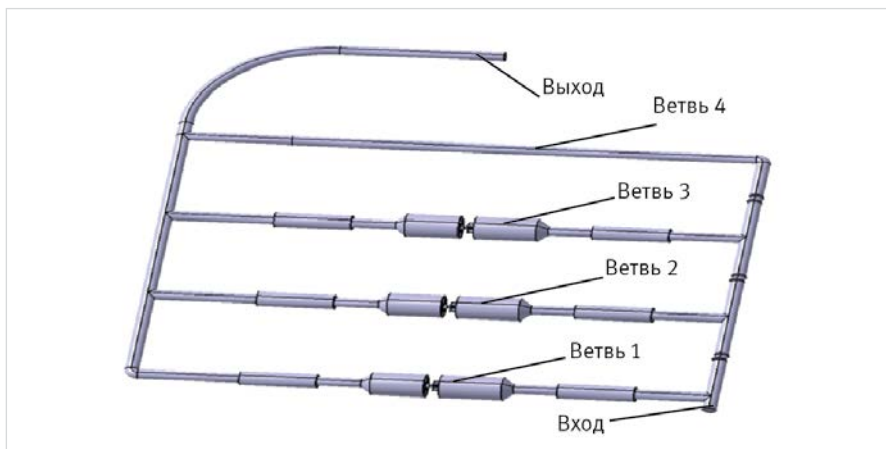


Рис. 4 — Проточная часть экспериментального стэнда

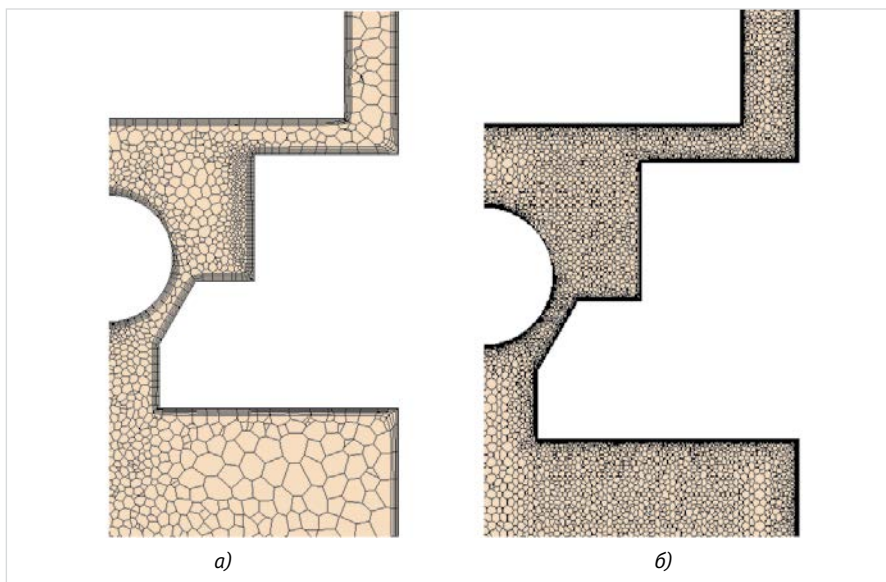


Рис. 5 — Сетка расчетной области в районе клапана: а) базовая; б) адаптированная

всех открытых клапанах (рис. 6а), при работе с одним закрытым клапаном при различных значениях давления на входе (рис. 6б и 6в) и режим работы при одном открытом клапане (рис. 6г). Полученные данные были усреднены и обработаны в соответствии с расположением датчиков в натурном экспериментальном исследовании.

По итогам моделирования газодинамического стенда, получена его гидравлическая характеристика расхода от перепада давления, представленная на рис. 7. Как видно из рис. 7, приведенная зависимость показывает, что при установке одинаковых сопротивлений в основной магистрали расход, при котором срабатывают двухпозиционные клапаны, растет с последующим срабатыванием очередного клапана. При этом третий клапан срабатывает вне диапазона регулирования, установленного на уровне 30%. Таким образом, определение гидравлических характеристик стенда для дальнейшей работы стенда не представляет практического интереса, так как срабатывание третьего клапана в численном эксперименте происходит за пределами диапазона регулирования. Дальнейшая работа системы определяется только гидравлическим сопротивлением основной магистрали, состоящим из трех последовательных гидравлических сопротивлений шаровых клапанов, гидравлического сопротивления трения и местного гидравлического сопротивления, связанного с разворотом потока перед выходом.

С помощью численного эксперимента для каждого положения двухпозиционных клапанов прямого действия с магнитами было определено распределение расхода по ветвям экспериментального стенда для открытых и закрытых положений клапанов. Получены значения перепадов давлений на клапанах и расходов по ветвям для открытых и закрытых положений клапанов, расположенных в экспериментальном стенде. Расчеты показали, что в экспериментальной установке имеет место перераспределение расхода по ветвям в соответствии с гидравлическим сопротивлением участков. Было показано, что соотношение расходов по участкам практически не зависит от величины давления на входе, а определяется только гидравлическим сопротивлением шаровых кранов основной магистрали. Однако перед и после закрытия двухпозиционных клапанов расход по участкам распределяется неравномерно. При этом показано, что настройка адаптивной системы регулирования расхода должна производиться для различных сопротивлений дросселей, выбираемых на основе гидравлических расчетов. Данные сопротивления должны определяться для соответствующих условий работы системы.

После численного моделирования и лабораторных испытаний был построен полноразмерный прототип камеры АСПП для проведения промышленных испытаний. Для проведения испытаний по подтверждению гидравлических характеристик АСПП был спроектирован и изготовлен стенд (рис. 8), содержащий, кроме всего прочего, следующее оборудование: насосный агрегат, манометры на входной, выходной камере и на магнитном клапане, а также расходомерное устройство. Камера АСПП была испытана на различных флюидах (вода, дизель, газ, буровой раствор). Во время испытаний с помощью насосного агрегата увеличивалось входное давление

№ ветви	Расход $G_i$ , кг/с	Относительный расход, $G_i/G_{\Sigma} \cdot 100\%$	Перепад давления, $\cdot 10^5$ Па
1	0,69e-2	27,8	0,7394
2	0,48e-2	19,2	0,37
3	0,30e-2	12	0,15
4	1,03e-2	41	
S	2,515e-2	100	

Таб. 1 — Распределение расхода по веткам и перепад давления на клапанах

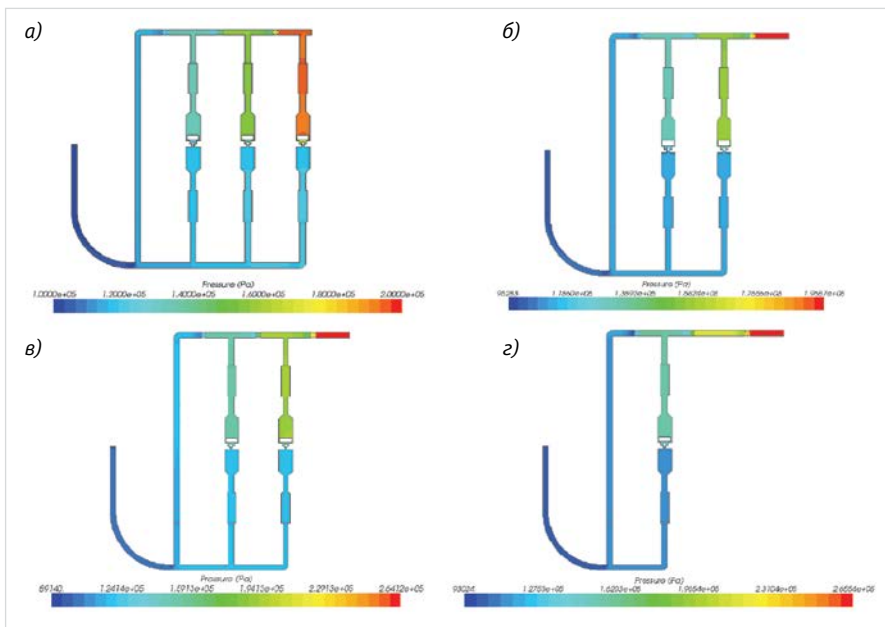


Рис. 6 — Поле давления для различных режимов работы АСПП: а) все клапаны открыты ( $p_{in}=2 \cdot 10^5$  Па); б, в) один клапан закрыт ( $p_{in}=2 \cdot 10^5$  Па;  $p_{in}=2,7 \cdot 10^5$  Па); з) открыт один клапан ( $p_{in}=2,7 \cdot 10^5$  Па)

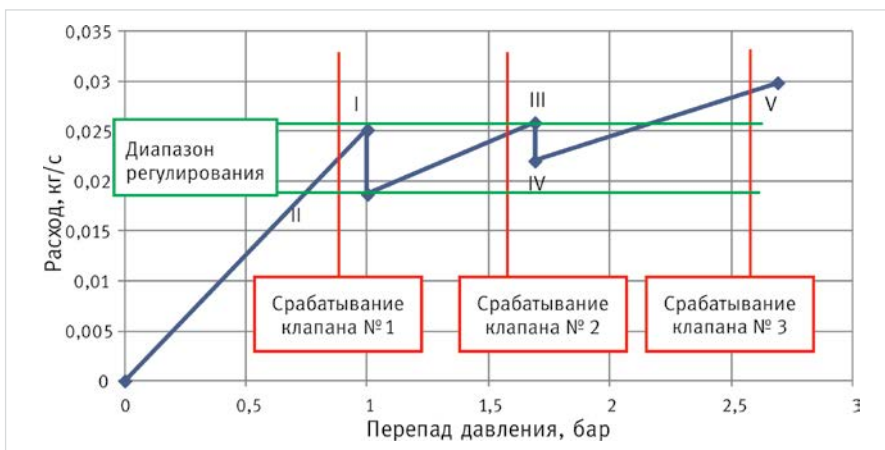


Рис. 7 — Зависимость общего расхода от перепада давления: I–V — расчет

(соответственно, увеличивался расход флюида) и проводились наблюдения по изменению гидравлических характеристик и расходов после срабатывания клапанов. Результаты испытаний на газе показаны на рис. 9.

Через систему фильтровался газ при постепенном увеличении перепада давления в 10 раз (верхний график рис. 9). В полевых условиях такое увеличение депрессии должно привести к увеличению дебита газа, по крайней мере, в 100 раз. Последовательное срабатывание клапанов АСПП позволило уменьшить сопротивление в системе, тем самым сохранив запланированный расход газа через систему на уровне 700 л/мин (с отклонением  $\pm 13\%$ ) (нижний график рис. 9).



Рис. 8 — Промышленные испытания клапанов АСПП



## Итоги

Изложена полная методология по созданию новой системы регулирования притока, как элемента заканчивания скважин.

## Выводы

Описанный в статье цикл проектирования, моделирования, испытания и дальнейшего производства нового оборудования позволит российским добывающим и нефтесервисным компаниям вести разработку собственных технологий и реагировать на внешние факторы и внутренние потребности рынка.

## Список литературы

1. Журавлев О.Н., Нухаев М.Т., Щелушкин Р. Российские системы заканчивания горизонтальных скважин // Нефтесервис. 2013. №4 (24) зима. С. 38–40
2. Нухаев М.Т., Журавлев О.Н., Щелушкин Р., Андрианов О., Володин А., Сорокин В. Особенности оборудования для строительства горизонтальных скважин // Neftegaz.RU. 2014. 3–4. С. 20–23
3. Волков В.Ю., Скибин А.П., Журавлев О.Н., Нухаев М.Т., Кюрджиев Ю.В. Расчетно-экспериментальное исследование характеристик двухпозиционного клапана с постоянным магнитом // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. №12. С. 27–30.
4. User guide, STAR-CCM+ Version 8.02, 2012. 12360 p.
5. Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics. Springer, 202, 423 p.

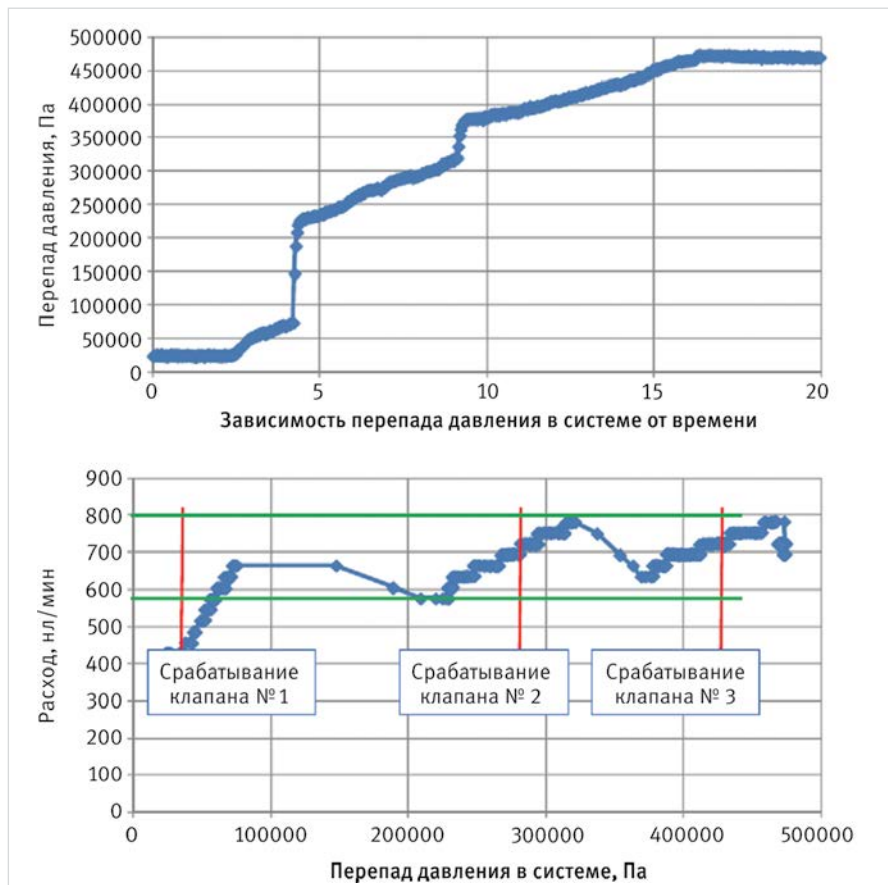


Рис. 9 — Результаты лабораторно-промышленного испытания АСПП

ENGLISH

OIL PRODUCTION

## Designing and well completion testing of control system of inflow rate

UDC 622.276

### Authors:

**Dmitry A. Semikin** — JV projects Exploration Head<sup>1</sup>; [dsemik@yandex.ru](mailto:dsemik@yandex.ru)  
**Marat T. Nukhaev** — Ph.D., associate professor<sup>2</sup>; [mnukhaev@hotmail.com](mailto:mnukhaev@hotmail.com)  
**Andrey V. Zhakovschikov** — lead engineer<sup>3</sup>; [azhakovschikov@gmail.com](mailto:azhakovschikov@gmail.com)

<sup>1</sup>RN Exploration, LLC, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian State University, Krasnoyarsk, Russian Federation

<sup>3</sup>LUKOIL-Nizhnevolzhskneft, LLC, Astrakhan, Russian Federation

### Abstract

The article describes the experience of “LUKOIL-Nizhnevolzhskneft” in designing, simulation and testing new well equipment, designed for controlling inflows of hydrocarbons in horizontal wells while developing reserves.

### Materials and methods

The process design includes the consideration of special requirements for new equipment, designing test bench in a laboratory,

preliminary assessment of the idea. The next step is — a numerical simulation to specify design peculiarities, engineering design. The final stage is — the creating of engineering prototype and hydraulic parameters testing using the test bench.

### Results

The methodology for designing the adaptive control system of the inflow rate, as the element of well completion, is represented in the article.

### Conclusions

The stages of design, simulation, testing and further manufacturing of the new equipment, described in the article, can help the Russian operators and service companies to develop their own technologies, to respond to external factors and internal needs of the market.

### Keywords

adaptive control system of the inflow rate, direct acting valve, test bench, flow rate, pressure difference

### References

1. Zhuravlev O.N., Nukhaev M.T., Shchelushkin R. *Rossiyskie sistemy zakanchivaniya gorizontallykh skvazhin* [Russian completion systems for horizontal wells]. *Nefteservis*, 2013, issue 4 (24) winter, pp. 38–40.
2. Nukhaev M.T., Zhuravlev O.N., Shchelushkin R., Andrianov O., Volodin A., Sorokin V. *Osobennosti*

*oborudovaniya dlya stroitel'stva gorizontallykh skvazhin* [Peculiarities of equipment for the construction of horizontal wells]. *Neftegaz.RU*, 2014, issue 3–4, pp. 20–23.

3. Volkov V.Yu., Skibin A.P., Zhuravlev O.N., Nukhaev M.T., Kyurdzhiev Yu.V. *Raschetno-eksperimental'noe issledovanie kharakteristik dvukhpozitsionnogo klapana s postoyannym magnitom* [Numerical

and experimental research of the check valve with the permanent magnet hydraulic characteristics]. *Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie*, 2014, issue 12, pp. 27–30.

4. User guide, STAR-CCM+ Version 8.02, 2012. 12360 p.
5. Ferziger J.H., Peric M. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer, 202, 423 p.