



УДК 532.528.1:533.54:533.57:621.6.052

Разработка систем для поверхностной перекачки газожидкостной смеси с концентрацией газа до 95 %

Development of Systems for Surface Transfer of Gas-liquid Mixture With Gas Concentration up to 95 %



А.Н. Мусинский

Представлены результаты разработки систем на базе струйного и мультифазного насосов для поверхностной перекачки газожидкостной смеси с концентрацией газа до 95 %. Проведены численные расчеты спроектированных узлов и экспериментальные исследования устройств, подтверждающие работоспособность разработанных систем.

Ключевые слова: трудноизвлекаемые запасы нефти, интенсификация добычи нефти, снижение депрессии на пласт, многостадийный гидроразрыв пласта (МГРП), увеличение притока методом МГРП, устройства для поверхностной перекачки газожидкостной смеси (ГЖС), системы для поверхностной перекачки ГЖС на базе струйного и мультифазного насосов, компоновка мультифазного осевого насоса для перекачки газожидкостной смеси.

The paper presents the results of the development of systems based on jet and multiphase pumps for surface pumping of a gas-liquid mixture with a gas concentration of up to 95%. Numerical calculations of the designed units and experimental studies of devices were carried out, confirming the performance of the developed systems.

Key words: hard-to-recover oil reserves, oil production stimulation, reservoir depression drop-down, multi-stage hydro-fracturing (MHF), increase in well inflow by MHF method, the device for surface gas-liquid mixture (GLM) pumping, systems for surface GLM pumping at the basis of the jet and multiphase pumps, multiphase axial pump for gas-liquid mixture pumping.

А.Н. Мусинский

musinskij.an@novomet.ru

А.А. Одинцов

М.П. Пещеренко

К.С. Брюхова

/«Новомет-Пермь», г. Пермь/

A.N. Musinsky, A.A. Odintsov

M.P. Peshterenko, K.S. Bryukhova

/Novomet-Perm, Perm/

В настоящее время для увеличения объемов добычи нефти из трудноизвлекаемых запасов применяют методы интенсификации – снижение депрессии на пласт, многостадийный гидроразрыв пласта (МГРП). Снижение давления на забое до значений, меньших давления насыщения, приводит к выделению из нефти летучих углеводородов, образуется газожидкостная смесь с большой концентрацией нерастворенного газа. Увеличение притока методом МГРП также сопровождается ростом объема не только жидкости, но и газа. Поднятый на поверхность газ многократно увеличивается в объеме.

В соответствии с федеральным законом о запрете сжигания попутного газа добывающие компании ищут способы его полезного использования. В связи с этим растет число запросов на устройства для поверхностной перекачки газожидкостной смеси с концентрацией газа до 95 %.

В настоящий момент на рынке предлагается оборудование для перекачки газожидкостной смеси ГЖС с помощью мультифазных насосных систем производства Zultzer, Borenmann, однако стоимость таких комплексов сопоставима со стоимостью установок для подготовки и транспорта нефти с применением отстойников. На практике часто используются системы на базе струйного насоса, но возникают сложности с расчетом и подбором диаметра сопла, что приводит к заниженным значениям газосодержания перекачиваемой смеси.

Использование обычных центробежных насосов для перекачки газожидкостной смеси с концентрацией газа более 40 % приведет к срыву подачи и преждевременному выходу насоса из строя. В подтверждение этого известного факта можно привести типичную напорно-расходную характеристику электроцентробежного насоса при работе на газожидкостной смеси (рис. 1). Из рисунка видно, что с увеличением концентрации газа до 40 % рабочий диапазон насоса сократился до 85–100 м³/сут, при этом напор упал почти в два раза в сравнении с характеристикой на воде без газа (кривая с концентрацией газа 0 %).

Таким образом, осуществить перекачку ГЖС с высокой концентрацией газа типичным центробежным насосом не удастся, требуются решения с лучшей эффективностью, но сопоставимые по цене с обычной насосной системой.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

По результатам проведенного обзора современного оборудования для поверхностной перекачки ГЖС были сформулированы следующие задачи:

- на основе стендовых и численных исследований разработать системы для поверхностной перекачки газожидкостной смеси на базе струйного и мультифазного насосов;
- подобрать компоновку мультифазного насоса (число ступеней, частота вращения вала), позволяющую перекачать газожидкостную смесь с концентрацией газа более 90 %;
- аналитическим и экспериментальным способом подобрать компоновку (число ступеней основного насоса, диаметр сопла), позволяющую перекачать газожидкостную смесь с концентрацией газа более 90 % системой со струйным насосом.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОСЕВЫХ СТУПЕНЕЙ

Использование ступеней осевого типа в качестве мультифазных широко распространено в отрасли, например, мультифазные ступени Schlumberger (Poseidon), GE (GHP). Движение потока ГЖС по межлопастным каналам такой ступени от входа к выходу в осевом направлении, без поворотов, позволяет избежать появления газовой пробки на входе в рабочее колесо с последующей закупоркой входного сечения, а значит,

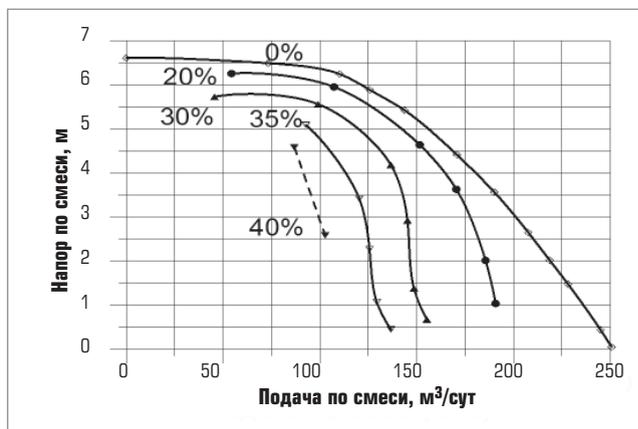


Рис. 1. Типичная напорно-расходная характеристика центробежного насоса при перекачке газожидкостной смеси

дает возможность перекачивать ГЖС с высокой концентрацией нерастворенного газа. В осевых ступенях, так же как и в центробежных, присутствует сепарация фаз разной плотности в поле центробежных сил, однако площадь входного сечения и ширина межлопастного канала в них существенно больше, поэтому для полного перекрытия каналов требуется гораздо большее количество свободного газа в потоке (табл. 1).

Согласно рис. 1, максимальные подачи при концентрации газа в ГЖС с 0 и 35 % отличаются примерно в два раза. Этот факт многократно подтверждается накопленным опытом испытаний насосных ступеней на жидкости с газом. Поэтому при разработке мультифазной ступени, учитывая такую деградацию, нужно закладывать максимальную подачу на воде, вдвое превышающую требуемую максимальную подачу ступени на ГЖС. Дополнительным требованием к качеству разработанной ступени является ее монотонно падающая напорно-расходная характеристика (НРХ).

Внешний вид ступени мультифазного осевого насоса с коммерческим названием МФОН7А-1600 (мультифазный осевой насос 7А габарита с максимальной подачей по ГЖС 1600 м³/сут) приведен на рис. 2. Рабочее

Таблица 1
Величина предельной концентрации газа (β_{max}) в ГЖС для ступеней разного типа

Тип насосной ступени	Внешний дизайн и форма канала РК	β_{max} , %
Центробежная		25
Диагональная		35
Осевая (шнековая)		75

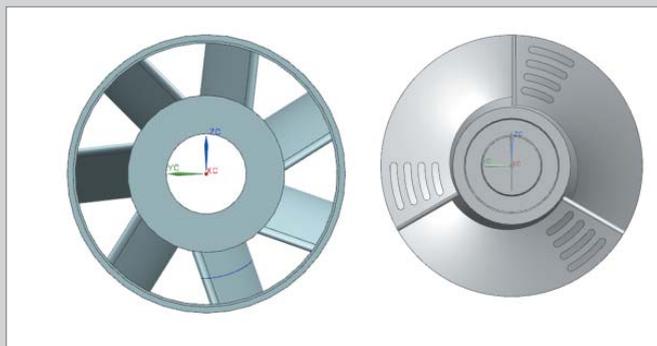


Рис. 2. Общий вид осевой ступени – направляющий аппарат и рабочее колесо

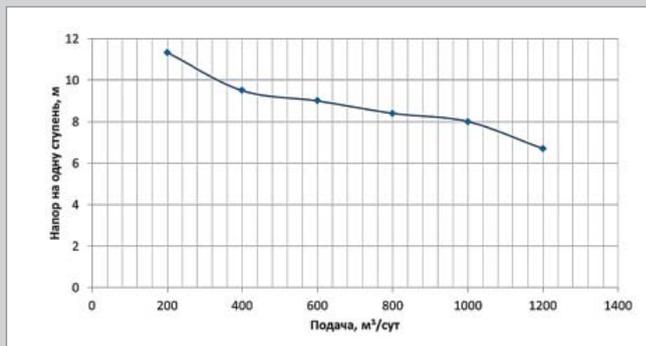


Рис. 3. Расчетная напорно-расходная характеристика осевой ступени МФОН7А-1600 на воде

колесо ступени содержит геликоидальные лопасти, причем количество лопастей мало для сохранения достаточной ширины проточных каналов. Направляющий аппарат выправляет закрученный рабочим колесом поток, преобразуя кинетическую энергию потока в давление [1]. Именно эту ступень, имеющую самый широкий диапазон подач в линейке серийных насосов «Новомет», взяли за основу при разработке системы поверхностной перекачки ГЖС.

Сначала строилась цифровая модель ступени, рассчитывались ее эксплуатационные характеристики с помощью методов численного моделирования. Расчетная НРХ на воде при частоте вращения вала 3000 об/мин приведена на рис. 3. Видно, что характеристика является монотонно падающей.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ МУЛЬТИФАЗНОГО НАСОСА

Следующим этапом разработки мультифазного насоса является исследование возможностей многоступенчатой сборки предложенных ступеней по перекачке ГЖС в стендовых условиях. Схема испытательного стенда приведена на рис. 4. Для контроля давления в каждой ступени в корпусе насосной секции были предусмотрены отверстия с установленными датчиками давления. Данные о величине давления на каждой ступени позволяли определить число ступеней в секции, на которых про-

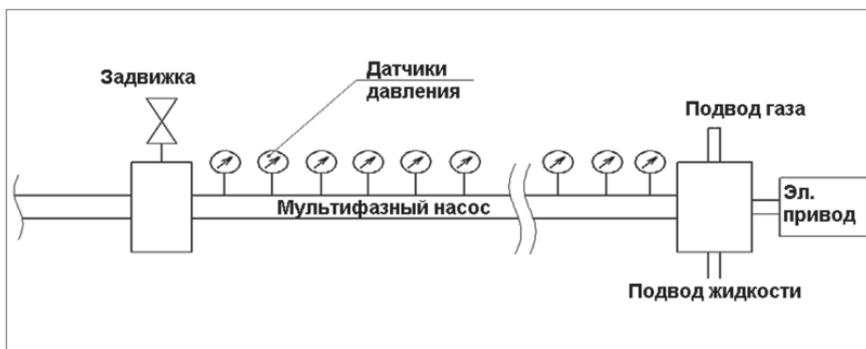


Рис. 4. Схема испытаний мультифазного насоса на газожидкостной смеси

исходит начальная диспергация ГЖС, но давление при этом ступень не создает.

Полная напорно-расходная характеристика секции получалась в результате замеров давления на нескольких подачах рабочей жидкости, обычно 8–10 равноотстоящих точек во всем диапазоне подач. Испытания проводились в следующем порядке. Устанавливался расход жидкости, соответствующий первой запланированной подаче. Последовательно выполнялись измерения при 5, 10, 15, ...% газа на приеме до срыва подачи. В каждой точке проводились замеры исследуемых величин (подача, напор, мощность, обороты привода) только после достижения установившегося режима работы. После срыва подачи поступление газа в устройство прекращалось. Далее устанавливалась следующая подача по жидкости, и по той же схеме проводились испытания при текущей подаче.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МФОН7А-1600 ПРИ 90 % ГАЗА

Из результатов испытаний и аналитических расчетов следует вывод, что для перекачки ГЖС с содержанием газа 90 % нужно не менее 17 ступеней (рис. 5) [2].

Для перекачки смеси с концентрацией более 90 % газа проводили испытания на секции МФОН7А-1600, состоящей из 17 ступеней при частоте вращения вала в 50 Гц. В ходе испытаний на ГЖС была получена НРХ насоса на воде. Затем в систему подавался газ. Были получены точки, где содержание газа в ГЖС превышало 75 %. При увеличении газосодержания свыше 85 % насос переставал создавать напор (рис. 6 а). Так как в нефтяной промышленности принято использовать для работы машин и механизмов частоты 50–60 Гц, решили провести испытания на частоте в 60 Гц для лучшего диспергирования ГЖС [3, 4]. Перед началом испытаний была получена

характеристика насоса на воде, а затем удалось получить несколько точек и построить кривую с концентрацией газа 90 % при положительном напоре (рис. 6 б).

Можно сделать вывод, что сборка мультифазного насоса из 17 ступеней при частоте вращения 60 Гц работоспособна при концентрации газа 90 %.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ СТРУЙНОГО НАСОСА

С целью подбора оптимальных геометрических параметров струйного насоса (диаметр сопла, диаметр и длина камеры смешения) были проведены исследования с варьированием геометрии струйного насоса. Последовательно устанавливались электроцентробежный насос (ЭЦН) с приводом и струйный насос (рис. 7). Жидкость прокачивалась по системе при помощи бустерного насоса, затем на электродвигателе задавалась частота 45 Гц и запускался ЭЦН, при этом все задвижки были полностью открыты. После приработки установки начиналась постепенная подача газа через компрессор на струйный насос (до 95 % газа в ГЖС) и записывались данные $Q_{ж}$ (подача жидкости, м³/сут), $Q_{г}$ (подача газа, м³/сут), $P_{вх}$ (давление на входе в установку, атм), $P_{с}$ (давление по-

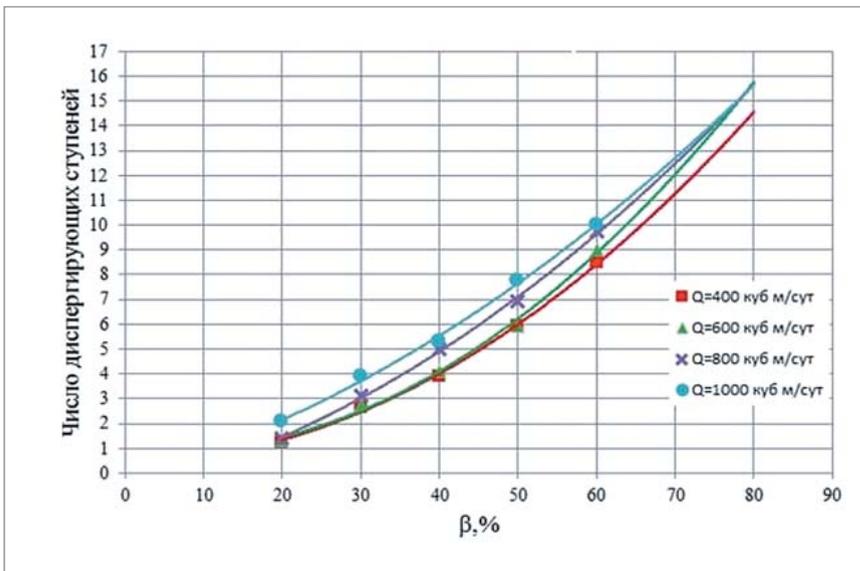


Рис. 5. Влияние $\beta_{вх}$ на число ступеней, не создающих напор (диспергирующих ГЖС)

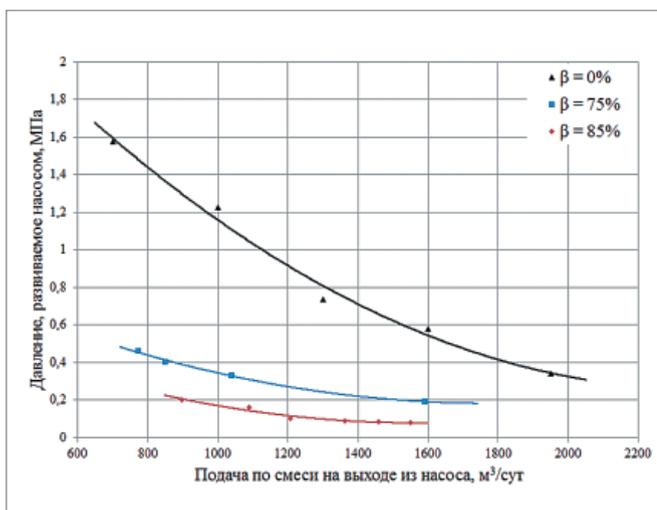
сле сопла, атм), $P_{вых н}$ (давление на выходе из центробежного насоса, атм), β (концентрация газа в ГЖС, %), $P_{вых}$ (давление на выходе из установки).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ СТРУЙНОГО НАСОСА

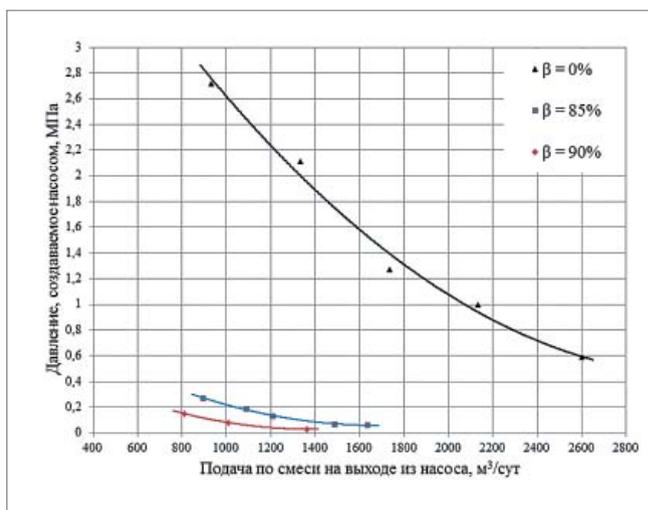
Система состояла из основного насоса ЭЦН5-60 длиной 1,5 м и струйного насоса с диаметром сопла 1,8 мм [5]. Записывали параметры системы при работе на воде (табл. 2, первая строка) и для про-

межуточных значений газосодержания (табл. 2, со 2 по 9 строчки). По результатам испытаний составили табл. 2, из которой видно, что максимальная концентрация газа, при которой система работоспособна, составляет 93 %.

Система на базе струйного насоса может обеспечить высокие давления за счет установки центробежного насоса, работающего на однофазной жидкости, перед струйным насосом. Даже в условиях, когда давление после струйного насоса падает в 2–3 раза, общее



а



б

Рис. 6. Напорно-расходная характеристика мультифазного насоса при концентрации газа 0, 75, 85 и 90 %. При частоте 50 Гц (а) и 60 Гц (б)

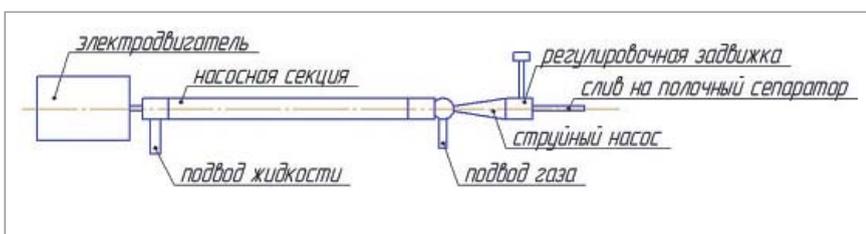


Рис. 7. Схема и фото стенда для испытаний системы на базе струйного насоса

Таблица 2

Параметры работы системы на базе струйного насоса при перекачке ГЖС

№	$Q_{ж}$	$Q_{г}$	$P_{вх}$	P_c	$P_{вых}$	β	$P_{вых н}$
1	61	0	3,3	-0,94	11	0	39,0
2	61	13	3,3	-0,87	11	0,18	39,5
3	60	29	3,3	-0,74	11	0,33	39,8
4	60	84	3,3	-0,51	11	0,58	39,9
5	61	135	3,3	-0,2	11	0,69	40,3
6	60	203	3,3	0	11	0,77	39,9
7	61	347	3,3	1,5	11	0,85	40,4
8	60	550	3,3	2,2	11	0,90	40,7
9	60	750	3,3	3,2	11	0,93	40,5

давление системы остается более высоким, чем давление, создаваемое мультифазными насосами. Если установить после мультифазного центробежный насос, то будет происходить срыв подачи, так как проточные каналы центробежного насоса меньшего размера, и в них образуется газовая пробка.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

■ На основе стендовых и численных исследований разработаны системы для поверхностной перекачки газожидкостной смеси на базе струйного и мультифазного насосов.

■ Экспериментально подобрана компоновка мультифазного осевого насоса, которая сможет обеспечить перекачку газожидкостной смеси с концентрацией газа 90 %.

■ Аналитическим и экспериментальными способами подобрана компоновка, позволяющая перекачать газожидкостную смесь с концентрацией газа более 90 % системой со струйным насосом.

■ Разработанные системы для поверхностной перекачки ГЖС имеют ряд преимуществ в сравнении с аналогами, а именно:

- меньшая стоимость;
- использование зарекомендовавших себя серийных изделий для производства систем;
- высокий уровень мобильности и транспортабельности;
- малые осевые нагрузки, не требующие специального узла ввода, являющегося слабым элементом системы.

Литература

1. Патент РФ № 2368812 Погружной мультифазный насос // Пещеренко С.Н., Пещеренко М.П., Рабинович А.И., Перельман О.М., Дорогокопец Г.Л., Иванов О.Е., Куприн П.Б., Мельников М.Ю., Нагиев А.Т., Каплан А.Л.
2. Одинцов А.А., Мусинский А.Н., Пещеренко С.Н. Мультифазный насос для поверхностной перекачки газожидкостной смеси // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 2. – С. 62–64.
3. Пещеренко М.П., Перельман М.О., Пещеренко С.Н.

Мультифазный диспергирующий насос // Нефтяное хозяйство – 2014. – № 11. – С. 136–39.

4. Пещеренко М.П., Перельман О.М., Рабинович А.И., Каплан А.Л. Повышение эффективности эксплуатации УЭЦН путем применения мультифазных насосов // Бурение и нефть. – 2014. – № 4. – С. 56–60.

5. Патент РФ № 2715297 Установка для поверхностной перекачки газожидкостной смеси // Мусинский А.Н., Байдаров П.А., Одинцов А.А., Петров Д.А., Конюхов Д.Г., Перельман М.О., Пошвин Е.В.