

УДК 665.7

**ОБ ОЦЕНКЕ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С МЕХАНИЧЕСКИМ И ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ПРИВОДАМИ ДЛЯ РАЗРЫВА НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ**

Лурье З. Я., д.т.н., проф.,  
Цехмистро Л. Н., к.ф.н., доц.,  
Заяц Т. А., асп.\*

*Национальный технический университет «Харьковский  
политехнический институт»*

Тел. (057) 707-66-46

**Аннотация** – работа посвящена поиску критерия, который позволил бы по имеющейся информации дать оценку тенденции развития насосных агрегатов для проведения гидравлического разрыва пласта.

**Ключевые слова** – насосный агрегат, гидроразрыв пласта, решающий критерий.

*Постановка проблемы.* В настоящее время одним из эффективных методов интенсификации добычи нефти является гидравлический разрыв пласта (ГРП). Путем гидромеханического воздействия на продуктивный пласт подключаются дополнительные участки залежи, ранее не участвовавшие в разработке[1]. Для реализации ГРП в США, Румынии, России, КНР и других странах созданы специальные насосные агрегаты с различными конструктивными решениями и элементной базой. Обобщенно их можно разделить на две группы: насосные агрегаты (НА) с механическим приводом (НА<sub>м</sub>) и с гидравлическим приводом (НА<sub>г</sub>). В НА<sub>м</sub> возвратно-поступательное движение поршневых групп насосной части осуществляется трансмиссией, преобразующей вращательное движение приводного двигателя (дизеля или электродвигателя) в поступательное с помощью кривошипно-шатунного механизма. В НА<sub>г</sub>, появившихся позднее, используется элементная база объемного гидрооборудования, серийно выпускаемая промышленностью и непосредственно обеспечивающая возвратно-поступательное движение поршневых пар.

---

\* Научный руководитель: д.т.н., проф. Лурье З. Я.

© Лурье З. Я., Цехмистро Л. Н., Заяц Т. А.

Учитывая, что поле применения ГРП все время расширяется [2], возникает вопрос о том, какая из этих групп НА является более перспективной.

Настоящая статья посвящена решению этого вопроса.

*Анализ последних исследований.* Рассмотрим вначале НА<sub>м</sub>, краткая информация о которых имеется практически только на сайтах интернета. На рис.1 показан НА<sub>м</sub>FC-2251 производства фирмы США «Стюарт и Стивенсон» [3].

Он смонтирован на шасси и предназначен для закачки различных жидкостей под давлением в пласт в условиях нефтяных месторождений и для эксплуатации при длительных режимах работы.



Рис. 1. Насосный агрегат FC-2251 производства «Стюарт и Стивенсон» (США)

Насосный агрегат FC-2251 имеет дизельный двигатель, который через трансмиссию сообщает возвратно-поступательное движение пяти плунжерам насоса высокого давления. Обеспечивает регулирование подачи и давления закачиваемой жидкости в пласт, допускает работу при температуре окружающей среды от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $40^{\circ}\text{C}$ .

Основные технические характеристики насосного агрегата FC-2251, взятые с сайта [3] показаны в таблице 1.

Таблица 1 - Технические характеристики насосного агрегата FC-2251

Параметр, размерность	Значения и сведения на чем смонтирован НА, тип приводного двигателя
1. Монтажная база	автомобиль
2. Приводной двигатель	дизельный двигатель
3. Максимальное давление, МПа	105
4. Теоретическая подача насоса, л/мин	2547
5. Габариты [L×B×H], мм	12172×3200×4002
6. Масса, кг	37500

Фирма «Синергия» (Россия [4]) производит НА<sub>м</sub> для ГРП, один из которых модели СИН-31 изображен на рисунке 2.



Рис. 2. Насосный агрегат СИН-31 производства завода «Синергия»

Насосный агрегат СИН-31 смонтирован на автомобиле КРАЗ, имеет дизельный двигатель, пятиступенчатую гидромеханическую передачу и трехплунжерный насос высокого давления, в котором могут устанавливаться плунжеры диаметром 80, 100 и 125 мм. СИН-31 позволяет изменять подачу и давление закачиваемой в пласт жидкости. Основные технические характеристики насосного агрегата, взятые из сайта [4] показаны в таблице 2.

Таблица 2 - Технические характеристики насосного агрегата СИН-31

Параметр, размерность	Значения и сведения на чем смонтирован НА, тип приводного двигателя
1. Монтажная база	автомобиль КРАЗ
2. Приводной двигатель	дизель, коробка передач на 5 ступеней
3. Максимальное давление, МПа	45 – 100 в зависимости от диаметра плунжера
4. Теоретическая подача насоса, л/мин	1062 – 1650 соответственно при диаметре плунжера 100 и 125 мм и давлении 23 и 15 МПа
5. Габариты [L×B×H], мм	9560×2660×3700
6. Масса, кг	20000

Республика КНР предлагает на рынке НА<sub>м</sub> моделей YL и YLC [5] с использованием технологий американских компаний WesternCo. и OPICo., смонтированных на автомобиле. Эти НА<sub>м</sub> имеют дизельный

двигатель с коробкой передач и трехплунжерный насос высокого давления. Насосные агрегаты YL и YLC снабжены компьютерным центром по сбору и контролю информации с измерительных приборов и отображению кривых давления и подачи закачиваемой в пласт жидкости. На рисунке 3 изображен насосный агрегат модели YLC, а основные технические характеристики, взятые из сайта [5] для моделей YL, показаны в таблице 3.



Рис. 3. Насосный агрегат модели YLC

Таблица 3 – Технические характеристики насосного агрегата YLC

Параметр, размерность	Значения и сведения на чем смонтирован НА, тип приводного двигателя
1. Монтажная база	шасси по заказу клиента
2. Приводной двигатель	дизель с коробкой передач
3. Максимальное давление, МПа	70 – 105 в зависимости от типа установки
4. Теоретическая подача насоса, л/мин	900 – 1300 в зависимости от типа установки
5. Габариты [L×B×H], мм	9355×2500×3100 – 10250×2500×3800 в зависимости от типа установки
6. Масса, кг	20000 – 34000 в зависимости от типа установки

Республика Беларусь выпускает НА [6], изображенные на рисунке 4. Они смонтированы на шасси МЗКТ-652712, имеют дизельный двигатель и насос высокого давления.



Рис.4. Насосные агрегаты производства Беларуси H2501 и H2501-10

Основные характеристики насосного агрегата H2501-10 показаны в таблице 4.

Таблица 4 - Технические характеристики насосного агрегата H2501-10

Параметр, размерность	Значения и сведения на чем смонтирован НА, тип приводного двигателя
1. Монтажная база	шасси МЗКТ-652712
2. Приводной двигатель	Дизельный двигатель
3. Максимальное давление, МПа	105
4. Теоретическая подача насоса, л/мин	2050
5. Габариты [L×B×H], мм	12000×2500×4000
6. Масса, кг	36500

Остановимся на еще одном НА<sub>м</sub> производства России, который рассматривался в статье [7]. Речь пойдет о насосных агрегатах АНА-105, АНА-105М, АНА-105М-01 и АНА-105М-02. Организации ЗАО ПКБ «Автоматика», ОАО «Сибнефтемаш», ОАО «ПНИТИ» и ОАО «БурГеоСервис» поставляют полный комплекс этого оборудования [8]. В отличие от рассмотренных выше НА<sub>м</sub> они имеют трехплунжерный насос с газотурбинным приводом, состоящим из двух газотурбинных двигателей и двух планетарных коробок передач суммирующего редуктора. Модификации АНА-105 связаны с установкой на различные транспортные средства (трактор «Кировец», автомобиль МАЗ и др.). Технические характеристики, аналогично приведенным, показаны в таблице 5.

Таблица 5 - Технические характеристики насосного агрегата АНА-105

Параметр, размерность	Значения и сведения на чем смонтирован НА, тип приводного двигателя
1. Монтажная база	автомобиль
2. Приводной двигатель	Газотурбинные двигатели
3. Максимальное давление, МПа	105
4. Теоретическая подача насоса, л/мин	2060
5. Габариты [L×B×H], мм	9500×2600×3650
6. Масса, кг	19000

На сайте [8] отмечается, что масса этих НА по сравнению с дизельными НА<sub>м</sub> той же мощности минимум на 4000кг меньше.

Перейдем к НА<sub>г</sub>, оснащенным гидроприводом насосной части высокого давления. Воспользуемся работой [7], где он рассматривался.

Этот НА<sub>г</sub> разработан, как экспериментальный образец, совместно организациями России (ЦКБ «Титан», г.Волгоград, заводом газотурбинных двигателей, г.Калуга) и Украины (НИИ Гидропривод, г.Харьков). Насосный агрегат назван НА-105, включает пять одинаковых секций с монтажом на автомобиле. В процессе создания НА-105 впервые были разработаны регулируемые аксиально-поршневые насосы на масле с рабочим объемом 500 см<sup>3</sup>, частотой вращения 1500 об/мин (в НА-105 десять параллельно работающих насосов) на номинальное давление 35МПа с приводом от газовых турбин. НА-105 обеспечивает регулирование давления и подачи закачки в пласт различных жидкостей. В статье [7] приведены гидросхема одной секции НА-105 и описание ее работы, выходные характеристики объемного насоса. Отмечается, что первоначальное вступление секций в работу происходит последовательно с рассогласованием по времени (0,2с). Такая совместная асинхронная работа всех секций НА обеспечивает минимальную пульсацию подачи и давления на выходе. Имеется информация о всех гидроустройствах, входящих в состав НА-105. Гидроцилиндр на масле, штоки которого жестко соединены с двумя плунжерами гидроцилиндров, закачивающими попеременно жидкость в пласт под высоким давлением образуют единый цилиндр мультипликатор. Однако, массогабаритные параметры НА-105, прошедшего положительные испытания в Волгоградской области, не известны и поэтому в таблице 6 нами указаны приближенные значения.

Таблица 6 – Технические характеристики насосного агрегата НА-105

Параметр, размерность	Значения и сведения на чем смонтирован НА, тип приводного двигателя
1. Монтажная база	автомобиль
2. Приводной двигатель	гидропривод на базе регулируемого аксиально-поршневого насоса с наклонным диском модели АН-П-500/35 и цилиндра мультипликатора
3. Максимальное давление, МПа	105
4. Теоретическая подача насоса, л/мин	подача трех секций - 2250
5. Габариты [L×B×H], мм	условно приняты как у АНА-105 9500×2600×3650
6. Масса, кг	условно приняты как у АНА-105 19000

Анализ приведенной информации, в основном, взятой с сайтов, по вопросу создания НА в различных странах показывает:

– в основном изготавливаются НА<sub>м</sub> с механическим приводом по различным техническим решениям (кривошипно-шатунный механизм, коробка передач, трансмиссия и т.п.) с дизельным двигателем. В этих НА сложно осуществляются вопросы регулирования подачи и давления закачиваемой жидкости в пласт;

– разработан гидроприводной НА<sub>г</sub>, в котором приводная часть и насосная объединены в единое целое, что открывает возможности более плавного регулирования подачи и давления, уменьшает массогабаритные параметры, облегчает замену изношенных стандартных гидроустройств, позволяет компоновать НА из секций;

– отсутствуют принципиальные и кинематические схемы НА, результаты исследований динамических характеристик подачи и давлений закачиваемой жидкости в пласт;

– отсутствуют результаты промышленных испытаний и формулирование на их основе технических требований к показателям качества динамики НА.

*Формулирование целей статьи (постановка задания).* Результаты анализа НА, производимых в различных странах, показали, что их сравнительная оценка и выявление тенденции их развития в будущем может основываться, в качестве первого приближения, лишь на энергетических и массогабаритных показателях, приведенных в таблицах 1-6.

В связи с этим возникает задача поиска критерия, который по имеющейся информации об НА, позволил бы обобщенно ответить на поставленный вопрос.

*Основная часть.* Прежде, чем сформулировать критерий для поставленной задачи, уделим внимание поиску работ, в которых рассматривается подобная задача применительно к гидроустройствам (насосам и гидродвигателям).

Такой подход связан с тем, что НА для ГРП как раз и характеризуются развиваемой гидравлической мощностью и массогабаритными параметрами.

Одним из широко применяемых критериев принят критерий, который характеризует лишь компактность изделия, содержащий отношение массы  $m$ , приходящейся на единицу объема  $V$  насоса, гидромотора [2], в  $\frac{\text{кг}^2}{\text{м}^3}$ :

$$k_v = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

В работе [9] предлагается критерий, который по энергетическим и массогабаритным параметрам позволяет оценить технический уровень проектируемого или уже созданного, находящегося в эксплуатации гидромотора многократного действия

$$k = \frac{M \cdot \omega \cdot T}{m \cdot g \cdot L_x}, \quad (2)$$

где  $M$  – крутящий момент, в Н·м;  $\omega$  – угловая скорость вала гидромотора, в об/мин;  $T$  – долговечность, в часах;  $m$  – масса гидромотора, в кг;  $g$  – ускорение свободного падения, в м/с<sup>2</sup>;  $L_x = \sqrt{D \cdot L}$  – характерный размер, в м;  $D$  – диаметр гидромашин, в м;  $L$  – длина, в м. Числитель  $M \cdot \omega \cdot T$  представляет собой общее количество энергии, которое может быть реализовано гидромотором в течении времени  $T$ ; произведение  $\omega \cdot T$ , представляющее собой число циклов выходного звена гидромотора, пропорционально его ресурсу, выраженному в миллионах циклов.

Первой попыткой сформулировать критерий для данной задачи на базе критерия (2) является работа [7]. В ней принято следующее выражение:

$$k_{pml} = \frac{p_{\max} \cdot q_T}{m \cdot L_x} \quad (3)$$

где  $p_{\max}$  – максимальное давление жидкости на выходе НА, в МПа;  $q_T$  – теоретическая подача, в л/мин;  $L_x = \sqrt[3]{L \cdot B \cdot H}$  – характеристический размер, в м, где  $L$  – длина НА, в м,  $B$  – ширина НА, в м и  $H$  – высота НА, в м.

По этому критерию дается оценка теоретической гидравлической мощности НА, приходящейся на один килограмм



массы и один метр характеристического размера. Критерий является размерным Вт/кг·м, в нем не учитываются реальная подача, компактность изделия, характерные для оценки технического уровня объемной гидравлической техники. В связи с этим введем в числитель формулы (3) в качестве множителей коэффициент подачи  $k_n$ , как это принято для объемных насосов, и время работы НА, например, восьмичасовую смену  $t_{cm}$ , а в знаменатель вес изделия  $G$  вместо массы. Тогда получаем следующее выражение критерия

$$k_{AHL} = \frac{p_{max} \cdot q_T \cdot k_n \cdot t_{cm}}{G \cdot L_x}, \quad (4)$$

который безразмерен, учитывает фактическую подачу и представляет собой отношение переданной НА за время  $t_{cm}$  энергии на один Ньютон веса и один метр характеристического размера.

Заполняемость объема  $V$  будем учитывать критерием (1) и, следовательно, оценку сравнения различных НА предлагается выполнять на основе двух критериев (1) и (4), совокупность которых повышает ее объективность.

В таблице 7 приведены результаты расчета критериев  $k_{AHL}$  и  $k_v$  на основе данных таблиц 1-6 анализируемых НА.

Таблица 7 - Результаты расчета критериев  $k_{AHL}$  и  $k_v$

Модель насосного агрегата	Страна изготовитель	$p_{max}$ , МПа	$q_T$ , л/мин (м <sup>3</sup> /с)	$m$ (G), кг (Н)	$V = \frac{H \cdot B \cdot L}{M^3}$	$L_x = \sqrt[3]{V}$ м	$k_{AHL}$	$k_v$ , кг/м <sup>3</sup>
1.FC-2251	США	105	2547 (0,04245)	37500 (367875)	155,78	5,382	59651	240,57
2.СИН-31	Россия	100	1650 (0,0275)	20000 (196200)	94,09	4,548	81652	212,56
3.YLC	КНР	105	1300 (0,02166)	34000 (333540)	97,375	4,6	39282	349,2
4.H2501-10	Беларусь	105	2050 (0,0341)	36500 (358065)	120	4,932	53821	304,16
5.AHA-105	Россия	105	2060 (0,0343)	19000 (186390)	90,15	4,484	114288	210,75
6.HA-105	Россия и Украина	105	2250 (0,0375)	19000 (186390)	90,15	4,484	130256	210,75
7.ACF 1050	Румыния	105	1170 (0,0195)	18000 (176580)	70,11	4,123	74507	256,73

Причем коэффициент подачи  $k_n$  для поз.1-5 и 7 принят равным 0,92, а для поз.6  $k_n = 0,96$ . Это значение взято из технической документации на насос, входящий в состав НА-105. Исходные данные для поз.7 таблицы 7 заимствованы из работы [7]. Если сравнения НА выполнять по критерию  $k_{AHL}$ , то лучшим является НА-105. Если выбор осуществлять по критерию  $k_v$ , то лучшим представителем оказывается НА модели YLC (изготовитель – КНР). Такой результат характерен и при решении оптимизационных задач по многим критериям, когда среди множества решений нет ни одного с лучшими значениями (максимальными или минимальными) критериев. И тогда возникает вопрос какой результат выбрать? Из таблицы 7 видно, что при создании НА с улучшенным значением  $k_{AHL}$  критерий  $k_v$  ухудшается, т.е. эти критерии противоречивы. Для выбора наилучшего НА можно воспользоваться рекомендациями работы [10], когда выбирают решающий критерий в форме:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n C_i \Phi_i, \quad (5)$$

где  $C_i$  - показатель «важности» критерия, все  $C_i \geq 0$ , а сумма их  $C_1 + \dots + C_n = 1$ . Здесь буквой  $\Phi_i$  обозначены критерии.

Примем за решающий критерий

$$k = C_1 \cdot k_{AHL} + C_2 \cdot \beta \cdot k_v, \quad (6)$$

предварительно представив коэффициент  $k_v$  в безразмерном виде путем умножения на величину  $\beta = 1 \text{ м}^3/\text{кг}$ , что делает левую и правую части выражения (6) безразмерными, и где  $C_1 + C_2 = 1$ .

Значение  $C_1$  и  $C_2$  назначим исходя из значимости критерия в процессе создания НА. Естественно, что все усилия разработчиков направлены на повышение энергетических характеристик НА и в меньшей степени – на компактность НА. При этом следует отметить, что масса  $m$  объемной гидромашины (радиально – и аксиально-поршневых насосов, шестеренных насосов и др.) с небольшим допущением равномерно распределена в занимаемом объеме  $V$ . Этого нельзя сказать о НА, там в занимаемом объеме есть много пустот. Поэтому есть основание принять  $C_1 = 0,8$  и  $C_2 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ . В таблице 8 приведены значения решающего критерия (6) с принятыми значениями  $C_1$  и  $C_2$  для семи рассматриваемых НА.

Таблиця 8 – Результати расчета решающего критерия

Модель насосного агрегата, страна-изготовитель	$k_{AHL}$	$k_V$ , кг/м <sup>3</sup>	$k = 0,8 \cdot k_{AHL} + 0,2 \cdot \beta \cdot k_V$ (безразмерный)
1. FC-2251 (США)	59651	240,57	47768,91
2. СИН-31 (Россия)	81652	212,56	65364,11
3. YLC (КНР)	39282	349,2	31495,44
4. H2501-10 (Белоруссия)	53821	304,16	43117,63
5. АНА-105 (Россия)	114288	210,75	91472,55
6. НА-105 (Россия и Украина)	130256	210,75	104247
7. АСF 1050 (Румыния)	74507	256,73	59656,95

Из таблицы 8 однозначно следует, что технические решения, заложенные при разработке НА-105, являются перспективными.

*Выводы:*

1. Выполненный аналитический обзор созданных насосных агрегатов для ГРП в различных странах (в основном с сайтов интернета) позволил выявить следующее:

- в большинстве стран изготавливаются НА с механическим приводом с различными техническими решениями и дизельным двигателем;

- публикуемая информация отражает лишь обобщенные сведения по энергетическим и массогабаритным характеристикам;

- отсутствуют результаты динамических исследований и промышленных испытаний НА, что существенно затрудняет оценку состояния вопроса и перспективной тенденции развития насосных агрегатов.

2. Предложенный решающий критерий, отражающий совокупность энергетических и массогабаритных характеристик, компактность, позволил обосновать, что дальнейшее развитие будет связано также и с гидроприводными насосными агрегатами, т.е. с более широким применением современных объемных гидромашин и гидроаппаратуры.

## Литература:

1. Б.М. Сучков. Интенсификация работы скважин. Ижевск: «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. - 396с.
2. Аврунин Г.А., Грицай И.В., Кириченко И.Г., Мороз И.И., Щербак О.В. Объемный гидропривод и гидропневмоавтоматика. Харьков: ХНАДУ, 2008. -107с.
3. Насосный агрегат фирмы «Stewart and Stevenson» (США) - [http://weatherford.ru/ru/service/production/51/193?TB\\_iframe=true&height=550&width=900](http://weatherford.ru/ru/service/production/51/193?TB_iframe=true&height=550&width=900)
4. «Синергия»- <http://sinergia/Ru/sin31/shtm/>, [http://sinergia/Ru/sin35\\_komplex/shtm/](http://sinergia/Ru/sin35_komplex/shtm/)
5. Насосные агрегаты производства КНР - [http://www.petrocasco.com/cp\\_product/scripts/html/3/329.htm](http://www.petrocasco.com/cp_product/scripts/html/3/329.htm)
6. Насосные агрегаты производства Беларуси - <http://www.fidmashnov.by/prod/ustanovki-nasosnye-2/ustanovka-nasosnaya-n2501-10/>, <http://gskp.belgiss.by/Detail.php?UrlGoodsId=28634&UrlKlpId=25900&UrlGoodsAssrId=58614&TabId=1&PHPSESSID=c82cfd3148a2eaac48a869bfe3b47a25>
7. Лур'є З.Я., Гасюк А.И. Математическая модель гидроприводного насосного агрегата для разрыва нефтяных пластов. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету, Мелітополь:ТДАУ, 2010: Випуск №10, Т.9.
8. Насосные агрегаты ЗАО «ПКБ» Автоматика – [www.automatika.ru](http://www.automatika.ru)
9. А.В. Докукин, А.Я. Рогов, Л.С. Хейфец. Радиально-поршневые гидромоторы многократного действия: Конструкция, теория и расчет.- М.: Машиностроение, 1980.
10. И.М.Соболь, Р.Б.Статников. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.:Дрофа, 2006. – 175с.

**ПРО ОЦІНКУ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ З МЕХАНІЧНИМ І ГІДРАВЛІЧНИМ ПРИВОДАМИ ДЛЯ РОЗРИВУ НАФТОВИХ ПЛАСТІВ**

Лур'є З.Я., Цехмістро Л.М., Заяць Т.О.

**Анотація** -робота присвячена пошуку критерію, який би дозволив за наявної інформації оцінити тенденцію розвитку насосних агрегатів для проведення гідравлічного розриву пласта.

**ABOUT THE ASSESSMENT OF HYDRAULIC FRACTURING  
PUMP UNITS WITH MECHANICAL AND HYDRAULIC DRIVES**

Z. Lurie, L. Tzekhmistro, T. Zaiats

*Summary*

**The work is devoted to the search for the criteria that would allow assessing the hydraulic fracturing pump units' development trend.**