



УДК 622.279

Методика расчета пневмокомпенсаторов для плунжерных насосов с погружным приводом

Э.О.ТИМАШЕВ*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия*

Как цитировать эту статью: Тимашев Э.О. Методика расчета пневмокомпенсаторов для плунжерных насосов с погружным приводом // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 582-590. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.10

Аннотация. Одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности механизированной нефтедобычи является установка плунжерного насоса с погружным приводом, позволяющая получить гармоничное возвратно-поступательное движение плунжера. В процессе откачки скважинной продукции плунжерными насосами происходят колебания скорости и давления жидкости в подъемных трубах, которые ведут к увеличению циклических переменных нагрузок на плунжер, снижению ресурса работы привода и КПД насосной установки.

Для устранения пульсационной характеристики плунжерного насоса и повышения показателей надежности насосной установки (в частности, межремонтного периода) могут быть использованы пневмокомпенсаторы. Разработан метод расчета оптимальных технологических параметров системы глубинных пневмокомпенсаторов для плунжерных насосных установок с погружным приводом, основанный на математическом моделировании гидродинамических процессов в трубах.

Выполнены расчеты формирования скорости потока и давления в подъемных трубах погружных плунжерных установок, оборудованных пневмокомпенсаторами (ПК), проанализировано влияние технологических параметров ПК на эффективность сглаживания колебаний скорости и давления в трубах. Установлен нелинейный характер влияния давления зарядки и суммарного объема ПК на эффективность их работы. Обосновано оптимальное давление зарядки ПК, соответствующее минимальному давлению в НКТ в течение цикла откачки для рассматриваемого сечения НКТ.

Рассмотрены два предельных случая размещения системы ПК вдоль лифтовых труб. В первом варианте ПК устанавливаются последовательно непосредственно на выкиде плунжерного насоса, во втором – равномерно вдоль подъемного лифта. Показано, что первый вариант обеспечивает минимальную величину амплитуды колебаний давления в нижнем конце НКТ и, соответственно, переменных нагрузок на плунжер насоса. Характер колебаний давления и скорости потока в НКТ на устье скважины для обоих вариантов размещения ПК имеет близкие значения.

Ключевые слова: насосная установка с погружным приводом; колебания давления; выравнивание скорости течения; пневмокомпенсатор; вязкая жидкость; технологические параметры; рабочее давление; объем газовой камеры; интервал установки

Введение. Значительное число месторождений на территории России вступило в позднюю стадию разработки, характеризуемую ростом доли вовлекаемых в разработку запасов высоковязкой нефти. Повсеместное применение методов заводнения в системах поддержания пластового давления обуславливает рост обводненности продукции. Эксплуатация скважин в интервале обводненности 45-70 % сопровождается рядом осложнений, связанных с образованием высоковязких водонефтяных эмульсий [6, 7]. Увеличение вязкости продукции оказывает отрицательное влияние на эффективность механизированной эксплуатации скважин. В этих условиях важной задачей рентабельной разработки нефтяных месторождений, эксплуатируемых механизированным способом, является совершенствование используемых технических средств, способствующих повышению эффективности работы насосного оборудования и увеличению межремонтного периода (МРП) [10, 11]. При эксплуатации скважин низко- и малodeбитного фонда наибольшее распространение получили штанговые насосные установки с плунжерными насосами (УСШН), которыми оборудовано около 60 % общего фонда нефтяных скважин России [8, 13].

Одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности нефтедобычи плунжерными насосами является установка плунжерного насоса, в качестве привода для которой используется линейный (погружной) электродвигатель (УПЛД). Погружной привод позволяет получить непосредственно гармоничное возвратно-поступательное движение плунжера насоса, что способствует снижению ограничений при добыче, связанных с наличием станка-качалки и колонны штанг, что особенно актуально при добыче высоковязкой продукции. В частности, на-



личие штанговой колонны приводит к снижению проходного сечения НКТ и повышению гидравлических сопротивлений, росту нагрузок на привод за счет вязкого трения штанг о жидкость [7, 15].

Постановка проблемы. В процессе откачки скважинной продукции плунжерными насосами (УСШН, УПЛД) происходят колебания (пульсации) скорости и давления жидкости в НКТ и выкидной линии скважины. Основными причинами возникновения колебаний являются: неравномерный характер подачи плунжерного насоса, влияние сил вязкого трения, сжимаемости и инерции откачиваемой жидкости. Чрезмерное повышение давления при страгивании жидкости (особенно высоковязкой) в начале хода плунжера вверх, передаваемое на плунжер в виде импульса нагрузок, ведет к увеличению напряженности и снижению ресурса работы привода и КПД насосной установки. Кроме того, пульсационный характер давления обуславливает возникновение циклических знакопеременных нагрузок на плунжер, амплитуда которых достигает нескольких МПа и закономерно повышается с ростом вязкости продукции. Это способствует повышенному усталостному износу насосного оборудования и оказывает негативное влияние на надежность работы привода, обуславливая снижение МРП.

Для устранения пульсационной характеристики плунжерного насоса и увеличения МРП насосной установки могут быть использованы пневмокомпенсаторы (ПК) как для буровых насосов, так и штанговых установок [1, 2, 5, 11]. Они предназначены для снижения амплитуды колебаний давления путем выравнивания скорости потока жидкости в НКТ. В общем виде пневмокомпенсатор включает в себя газовую и рабочую камеры, разделенные непроницаемой подвижной стенкой (в качестве стенки может быть использована, например, эластичная перегородка – диафрагма). Газовая камера пневмокомпенсатора заполнена газом под определенным давлением, рабочая камера сообщается с полостью НКТ (глубинный пневмокомпенсатор). При повышении скорости потока и давления в трубах происходит сжатие газовой камеры пневмокомпенсатора, и часть жидкости перетекает в освободившийся объем рабочей камеры ПК. При снижении скорости потока и давления в трубах пневмокомпенсатор отдает порцию жидкости в трубы, таким образом осуществляется выравнивание подачи в НКТ выше места установки пневмокомпенсатора. Эффективность работы пневмокомпенсаторов в общем случае определяется рядом параметров: давлением, объемом газа в газовой камере ПК, температурными условиями в интервале установки пневмокомпенсатора, составом и характеристиками закачиваемого газа, реологическими свойствами откачиваемой продукции и др. В данной работе при расчете пневмокомпенсаторов приняты следующие допущения: сжатие и расширение газа в газовой камере происходит по изотермическому закону; гидравлическими сопротивлениями, возникающими при перетекании откачиваемой жидкости между рабочей камерой ПК и полостью НКТ, а также кавитационными эффектами в результате воздействия переменного местного давления жидкости пренебрегается; коэффициент объемного сжатия откачиваемой жидкости принимается постоянным по всей длине НКТ; полагается, что температура жидкости в НКТ возрастает по глубине линейно с постоянным геотермическим градиентом. В качестве стандартного образца ПК рассматривается цилиндрический коаксиальный диафрагменный пневмокомпенсатор, подвижный элемент которого (эластичная упругая диафрагма) перемещается в пространстве между НКТ и внешней трубой (рис.1).

В работе предложен расчетный метод определения оптимальных технологических параметров глубинных ПК, базирующийся на математическом моделировании гидродинамических процессов в лифтовых трубах.

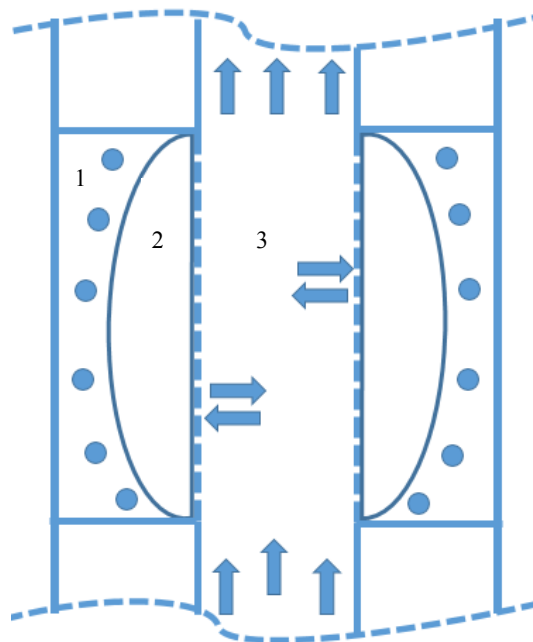


Рис.1. Схема пневмокомпенсатора

1 – газовая камера; 2 – рабочая камера; 3 – полость НКТ
(стрелками показаны возможные направления потоков)



Моделирование динамики скорости потока и давления в лифтовых трубах установок УПЛД. Для решения задачи обоснованного расчета оптимальных технологических параметров пневмокомпенсаторов предложен двухэтапный метод. На первом этапе выполняется математическое моделирование движения жидкости в лифтовых трубах при откачке жидкости УПЛД, по результатам моделирования строятся кривые динамики скорости жидкости и давления в различных сечениях лифтовых труб, соответствующих месту установки пневмокомпенсатора. На втором этапе на основе полученных кривых рассчитываются технологические параметры пневмокомпенсаторов.

Моделирование нестационарных гидродинамических процессов при течении газожидкостных потоков в трубах, как правило, базируется на численном решении уравнений Навье – Стокса. Теоретическим основам многофазных потоков в скважине посвящено множество исследований отечественных и зарубежных авторов [3, 4, 14-17]. Для расчета распределения скорости потока и давления в лифтовых трубах в процессе работы УПЛД разработана математическая модель нестационарного течения смеси в лифтовых трубах, базирующаяся на законах сохранения массы и импульса для газожидкостного потока [9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} &= \frac{1}{Sl} \frac{dm}{dt}; \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial z} &= -\frac{dp}{dz} - \frac{\tau \Pi}{S} - \rho g_z, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ , v – соответственно плотность, объемная доля и скорость откачиваемой смеси; l – длина пневмокомпенсатора; S – площадь внутреннего поперечного сечения труб; p – давление; τ – касательные напряжения на стенке труб; Π – периметр контакта жидкости со стенкой; g_z – проекция ускорения свободного падения вдоль координаты z ; скорость перетока массы между лифтовыми трубами и рабочей полостью пневмокомпенсатора, определяемая в предположении изотермичности процессов сжатия и расширения газовой камеры ПК согласно закону Бойля – Мариотта

$$\frac{dm}{dt} = -\rho \frac{p_0 V_0}{p^2} \frac{dp}{dt}, \quad (2)$$

p_0, V_0 – соответственно начальное давление и объем газовой камеры ПК. Величина, численно равная произведению $p_0 V_0$, называется энергоемкостью ПК.

Из формулы (2) следует, что с увеличением энергоемкости возрастает масса и объем жидкости, которую может принимать и отдавать пневмокомпенсатор в единицу времени. Для описания жидкой фазы используется модель слабосжимаемой жидкости [17]. В качестве граничных условий задаются: на входе – скорость жидкости на выкиде насоса, определяемая скоростью движения плунжера насоса, на выходе – заданное давление на конце промыслового нефтепровода. Результатом численного решения системы является изменение во времени скорости потока и давления в произвольном сечении подъемных труб [9, 17].

Особенностями предложенной модели являются: детальный учет характера распределения подачи плунжерного насоса для УПЛД – в полувелике всасывания скорость жидкости на выкиде насоса изменяется по гармоническому закону, в такте нагнетания равна нулю; наличие источников слагаемых, связанных с перетоками массы между полостями лифтовых труб и пневмокомпенсаторов.

На рис.2 показаны результаты расчета динамики скорости жидкости и гидродинамического давления (в качестве нулевой линии принимается статическое давление на данной глубине) в НКТ модельной скважины. Геолого-технические и технологические параметры ее работы: диаметр НКТ 62 мм; диаметр плунжера 57 мм; длина колонны НКТ 1000 м; вязкость жидкости 0,1 мПа·с; плотность жидкости 900 кг/м³; сжимаемость жидкости 1500 МПа⁻¹; температура на устье 20 °С; геотермический градиент 0,01 °С/м; длина хода 2,2 м; число качаний 10 мин⁻¹; длина выкидной линии 1000 м.

Участок *ac* (рис.2, *a*) соответствует такту всасывания и поступательному движению жидкости и плунжера насоса вверх, а участок *cd* характеризует такт нагнетания, в котором скорость



жидкости в нижнем конце НКТ, за исключением интервала движения плунжерного штока, равна нулю.

Кривые динамики скорости потока и давления на разных глубинах смещены относительно друг друга по фазе (в частности, точки b и b'), что обусловлено влиянием сжимаемости жидкости и сил гидродинамического трения. С уменьшением глубины происходит выравнивание скорости жидкости и давления в полуциклах откачки. Кривые изменения гидродинамического давления (рис.2, б) показывают, что среднеинтегральная за цикл откачки величина давления превышает величину статического, причем гидродинамическое давление увеличивается с ростом глубины вдоль оси скважины. Учет этих особенностей формирования полей скорости и давления позволяет осуществлять обоснованный расчет пневмокомпенсаторов в составе УПЛД.

Методика расчета геометрических и технологических параметров системы пневматических компенсаторов. Технологические параметры системы глубинных ПК включают: давление зарядки пневмокомпенсаторов (давление предварительно закачиваемого на поверхности газа в ПК), количество пневмокомпенсаторов стандартного образца (см. рис.1), определяющее суммарный объем газовых камер, и интервал их установки вдоль колонны НКТ. Известные методы расчета пневмокомпенсаторов [1, 2, 5, 12] являются в большей степени приближенными, поскольку не учитывают физических принципов формирования колебаний давления и скорости жидкости в трубах, а также конструктивные особенности рассмотренного типа глубинных пневмокомпенсаторов, представляющих цилиндрические камеры.

Полагается, что в скважине работа пневмокомпенсаторов происходит в изотермических условиях, т.е. увеличение давления в рабочей камере ПК приводит к уменьшению объема в газовой камере. Уравнение для изотермического сжатия газа в i -й камере

$$P'_{i0}V_{i0} = (P'_{i0} + \Delta P_i)(V_{i0} - \Delta V_i), \quad (3)$$

где $P'_{i0} = P_{i0} \frac{zT_i}{T_{i0}}$ – давление в газовой камере ПК в скважинных условиях; T_{i0} , T_i – температура окружающей среды в процессе зарядки и в скважинных условиях соответственно; P_{i0} , V_{i0} – соответственно давление зарядки (давление предварительно закачиваемого на поверхности газа в ПК) и суммарный объем пневмокомпенсаторов, расположенных на i -й глубине вдоль НКТ; ΔP_i , ΔV_i – изменение давления и объема газовых камер соответственно. Задаваясь величиной желаемой амплитуды колебаний давления после сглаживания ΔP_i , из формулы (3) можно определить суммарный объем пневмокомпенсаторов для i -го интервала

$$V_{i0} = \Delta V_i \left(1 + \frac{P_{i0}}{\Delta P_i} \right). \quad (4)$$

Скорость движения жидкости в нижнем конце НКТ в такте всасывания определяется скоростью движения плунжера насоса, а в такте нагнетания равна нулю:

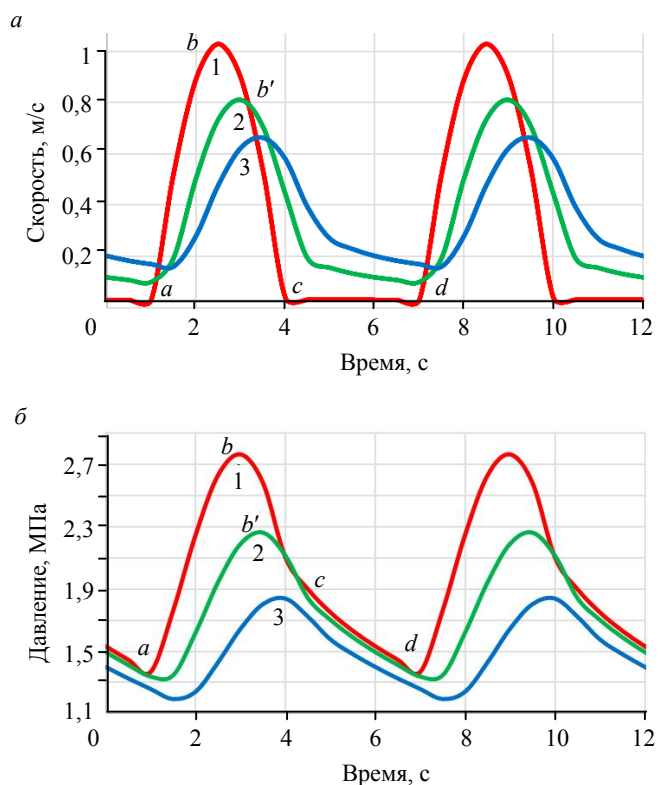


Рис.2. Скорость жидкости (а) и гидродинамическое давление жидкости (б) в НКТ
1 – глубина 1000 м; 2 – 750 м, 3 – 500 м



$$v = \pi S n \sin(2\pi n t) \frac{d_p^2}{d_i^2}; \quad 0 \leq t \leq T/2, \quad (5)$$

где t – время; S , n , $T = n^{-1}$ – соответственно длина хода, частота и период качаний плунжера; d_p , d_i – диаметр плунжера и внутренний диаметр НКТ соответственно.

Для выравнивания подачи плунжерного насоса необходимо, чтобы в период повышения скорости и давления в камеру поступал определенный объем жидкости, а в период понижения эквивалентный объем перепускался камерой обратно в лифтовые трубы. Вышесказанное позволяет обеспечить постоянную средне-интегральную скорость потока выше камеры

$$v_m = \int_0^T \pi S n \sin(2\pi n t) \frac{d_p^2}{d_i^2} dt = S n \frac{d_p^2}{d_i^2}. \quad (6)$$

Временной интервал t_1 - t_2 , в котором мгновенная скорость жидкости превышает средне-интегральную, определяется из выражений

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{1}{2\pi n} \arcsin\left(\frac{1}{\pi}\right); \\ t_2 &= \frac{1}{2\pi n} \left(1 - \arcsin\left(\frac{1}{\pi}\right)\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Объем жидкости ΔV_{pc} , который должен быть аккумулирован в рабочей камере пневмокомпенсаторов в период повышения скорости потока и давления, определяется разностью между мгновенной и средне-интегральной подачей насоса в период t_1 - t_2

$$\Delta V_{pc} = \frac{\pi d_i^2}{4} \left(\int_{t_1}^{t_2} v dt - v_m (t_2 - t_1) \right). \quad (8)$$

При использовании системы глубинных ПК данный объем жидкости представляет собой алгебраическую сумму объемов, аккумулируемых в газовых камерах каждого из пневмокомпенсаторов. Суммарное количество ПК в системе и интервал их размещения вдоль колонны НКТ определяется в общем случае из решения уравнения

$$\Delta V_{pc} = \sum_{i=1}^N \frac{V_i}{1 + P_{i0} / \Delta P_i}, \quad (9)$$

где N – общее число интервалов размещения ПК вдоль колонны НКТ.

При определении интервала расстановки системы ПК можно рассмотреть два предельных случая.

Вариант 1. Пневмокомпенсаторы устанавливаются последовательно на выкиде плунжерного насоса. Это позволяет увеличить суммарный объем «пневматической газовой подушки» системы ПК и тем самым обеспечить равномерный характер движения жидкости в лифтовых трубах в каждом из полуциклов откачки. Поскольку пневмокомпенсаторы устанавливаются близко друг к другу, их технологические параметры совпадают, в этом случае из формулы (9) можно получить следующее выражение для расчета количества стандартных ПК на выкиде насоса:

$$N = \frac{\Delta V_{pc}}{V_{pc}} \left(1 + \frac{P_0}{\Delta P} \right), \quad (10)$$

где V_{pc} – объем стандартного ПК.

Вариант 2. Пневмокомпенсаторы устанавливаются равномерно вдоль подъемного лифта. Полагается, что в этом случае система ПК позволяет облегчить условия страгивания жидкости в НКТ: в начале хода плунжера вверх в движение первоначально приводится столб жидкости, заключенный между насосом и первой камерой. Жидкость частично заполняет объем первой камеры и сжимает находящийся там газ. После достижения предельной величины давления в первой камере в движение приводится второй участок, расположенный между первой и второй камерами



и т.д. Поинтервальное страгивание столба жидкости в НКТ позволяет снизить экстремальные нагрузки на насосное оборудование в начале хода плунжера вверх [5]. При известной величине интервала размещения ПК, ΔL_{pc} (с учетом, что каждый из пневмокомпенсаторов системы принимает равное количество жидкости) количество ПК, расположенных в i -м интервале, рассчитывается согласно формуле:

$$N_i = \frac{\Delta V_{pc} \Delta L_{pc}}{V_{pc} L} \left(1 + \frac{P_{i0}}{\Delta P_i} \right), \quad (11)$$

где L – длина колонны НКТ, м.

Влияние технологических параметров пневмокомпенсаторов на эффективность сглаживания колебаний скорости потока и давления. Эффективность снижения колебаний скорости потока и давления определяется двумя ключевыми параметрами: давлением и объемом газа в газовой камере ПК (и, соответственно, энергоемкостью ПК). В качестве анализируемых технологических параметров, оказывающих влияние на амплитуду колебаний скорости потока и давления, рассматриваются: давление зарядки и суммарный объем пневмокомпенсаторов (под объемом одного ПК понимается максимально возможный объем газовой камеры ПК, определяемый его геометрическими характеристиками). Результирующий объем системы ПК регулируется изменением количества пневмокомпенсаторов стандартного образца, устанавливаемых в скважину. В качестве стандартного образца ПК рассматривается цилиндрический коаксиальный диафрагменный пневмокомпенсатор, подвижный элемент которого (эластичная упругая диафрагма) перемещается в пространстве между НКТ (внешний диаметр 73 мм) и внешней трубой (диаметр 100 мм), длина одной камеры 1 м. Моделируется работа УПЛД с системой глубинных ПК, размещенных на выкиде плунжерного насоса.

С увеличением суммарного объема ПК возрастает энергоемкость системы пневмокомпенсаторов, амплитуда колебаний скорости потока и давления закономерно снижаются (рис.3), причем по мере роста количества ПК темп сглаживания пульсаций давления снижается. Для оценки степени выравнивания давления в трубах используется понятие коэффициента пульсации давления [1, 2, 5]

$$\delta_p = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\text{mid}}}, \quad (12)$$

где P_{\max} , P_{\min} , P_{mid} – соответственно максимальное, минимальное и средне-интегральное давление за цикл откачки.

В рассмотренном примере начальный коэффициент пульсации составляет 0,67 (67 %), размах колебаний (разница между максимальным и минимальным значением) – 1,31 МПа. С увеличением результирующего объема газовых камер системы ПК от 50 до 200 м³ коэффициент пульсации снижается с 44 до 19 %, размах колебаний давления – с 0,87 до 0,37 МПа. Поскольку с увеличением суммарного объема ПК постепенно снижается амплитуда колебаний давления, уменьшается рабочий ход диафрагмы и эффективный объем жидкости, принимаемый ПК, поэтому связь между двумя величинами (коэффициентом пульсации и суммарным объемом пневмокомпенсаторов) близка к гиперболической.

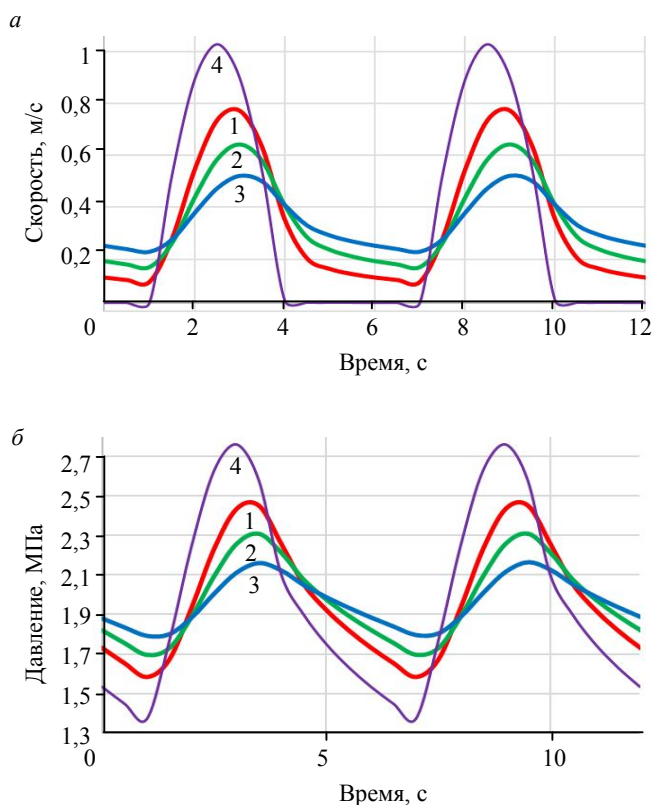


Рис.3. Динамика скорости потока (а) и гидродинамическое давление (б) в нижнем конце НКТ при различном суммарном объеме системы ПК
1 – 50 л (14 ПК); 2 – 100 л (28 ПК); 3 – 200 л (55 ПК); 4 – без ПК

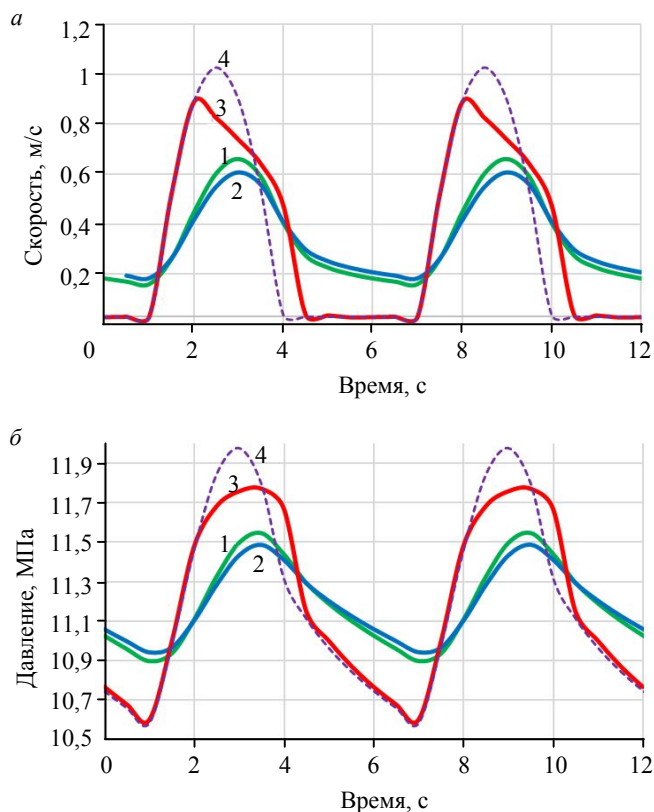


Рис.4. Динамика скорости потока (а) и давление (б) в нижнем конце НКТ при различном давлении зарядки

1 – 5,3 МПа (8 МПа в скважинных условиях);
2 – 7 МПа (10,5 МПа в скважинных условиях);
3 – 7,6 МПа (11,5 МПа в скважинных условиях); 4 – без ПК

но его конструктивными особенностями (см. рис.1), и подача пневмокомпенсатора прекращается. Нормальная работа пневмокомпенсатора достигается только при условии, что давление в полости НКТ превышает давление зарядки ПК.

Таким образом, чрезмерно высокое давление зарядки, так же как и чрезмерно низкое, оказывает отрицательное влияние на эффективность работы ПК. Исходя из этого, оптимальное давление зарядки рационально устанавливать равным минимальному давлению в НКТ в течение цикла откачки, т.е. сумме статического давления и минимального гидродинамического давления в НКТ при работе ПК (т.е. приблизительно 10,9 МПа, как следует из рис.4, б).

Следует отметить, что существующие методы расчета технологических параметров пневмокомпенсаторов не учитывают физических принципов формирования колебаний скорости потока и давления в трубах при работе ПК. В частности, в работах [1, 12] начальное давление в пневмокомпенсаторе (давление зарядки ПК в скважинных условиях) рекомендуется выбирать в интервале 25-80 % от максимального давления в течение цикла откачки, что в рассмотренном случае соответствует интервалу давлений 3-9,5 МПа и меньше оптимального значения (10,9 МПа), полученного согласно разработанной методике.

Анализ результатов расчетов. По предложенной методике выполнен расчет технологических параметров системы глубинных ПК для модельной скважины (см. таблицу).

Геометрические и технологические параметры системы пневмокомпенсаторов

Параметр ПК	Вариант 1	Вариант 2 (устье – выкид насоса)
Давление зарядки, МПа	7,3	1,3-7,3
Суммарный объем, м ³	0,095	0,003-0,019 ($\Sigma = 0,065$)
Энергоемкость, МДж	1,04	0,005-0,020 ($\Sigma = 0,56$)
Количество в системе	26	1-5 ($\Sigma = 20$)
Интервал расстановки, м	–	200

Характер влияния давления зарядки пневмокомпенсаторов на конфигурацию барограмм показан на рис.4. Вначале рост давления зарядки с 5,3 до 7 МПа (от 8 до 10,5 МПа в скважинных условиях, кривые 1 и 2 на рис.4, б) приводит к снижению амплитуды колебаний давления (коэффициент пульсации снижается с 0,33 до 0,27, размах колебаний – с 0,65 до 0,54 МПа): при более низком давлении зарядки давление жидкости в НКТ, в течение цикла откачки превышающее давление зарядки, обуславливает постоянное сжатие газовой камеры, и, следовательно, снижение рабочего хода диафрагмы ПК и эффективного объема жидкости, принимаемой ПК.

При росте давления зарядки с 10,5 до 11,5 МПа (пересчитанного в скважинные условия, кривые 2 и 3 на рис.4, б) амплитуда колебаний давления возрастает, причем форма барограммы претерпевает изменения. Если давление в НКТ снижается до величины, меньшей давления зарядки ПК (пересчитанной в скважинные условия с учетом изменения температуры в интервале установки ПК), в процессе расширения газовой камеры диафрагма полностью прилегает к внутренней стенке пневмокомпенсатора, что обусловле-



На рис.5 представлены кривые изменения во времени скорости потока и гидродинамического давления для двух сечений НКТ – на поверхности у устья скважины и в нижнем конце НКТ.

По мере подъема жидкости в НКТ давление жидкости и, соответственно, необходимое давление зарядки ПК, а также число ПК в заданном интервале снижается, что обусловлено снижением как гидростатической составляющей, так и потерь давления на гидродинамическое трение. В результате в варианте 2 (равномерное размещение) суммарное количество (на 36), суммарный объем (на 23) и энергоемкость системы ПК (на 46 %) меньше, чем в варианте 1 (размещение ПК в нижнем конце НКТ на выкиде плунжерного насоса). С точки зрения снижения колебаний скорости потока и давления на выкиде насоса, и, соответственно, переменных нагрузок на плунжер, вариант 1 является предпочтительным (коэффициент пульсации давления в варианте 1 составляет 0,28, в варианте 2 – 0,54, размах колебаний достигает 0,54 и 0,91 МПа соответственно). Характер колебаний давления и скорости в НКТ на устье скважины для обоих вариантов размещения ПК имеет близкие значения. Это обусловлено тем, что в варианте 2 формирование скорости потока и давления в НКТ на устье обусловлено работой всей системы глубинных ПК, а в нижней части НКТ прежде всего работой соответствующих ПК, расположенных ниже исследуемого сечения труб, тогда как в варианте 1 вся система ПК расположена на выкиде насоса и позволяет более эффективно сглаживать колебания давления и скорости потока во всем интервале НКТ.

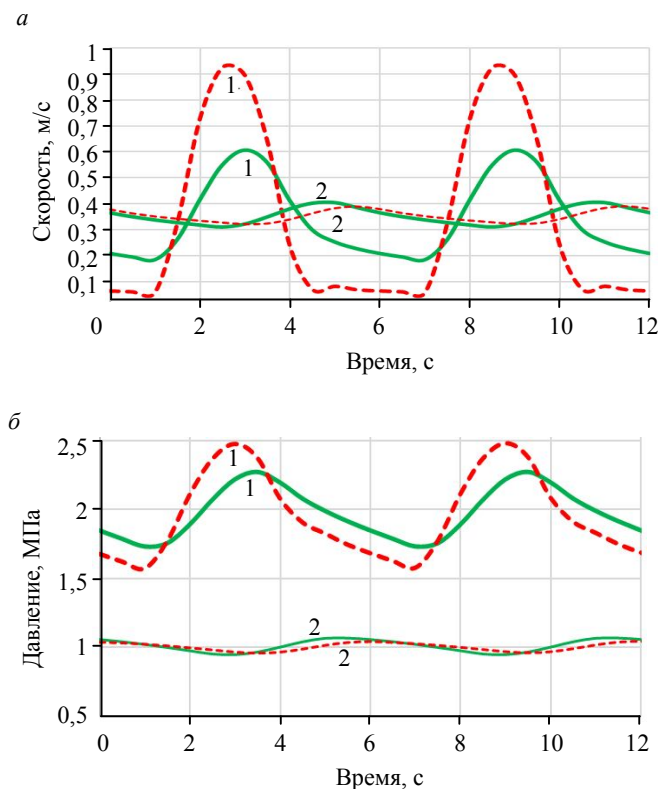


Рис.5. Динамика скорости потока (а) и гидродинамического давления (б) в нижнем конце НКТ

Сплошная линия – вариант 1 установки системы ПК,
штриховая линия – вариант 2;
1 – нижний конец НКТ; 2 – устье скважины

Выводы

1. Разработан метод расчета оптимальных геометрических размеров интервала установки и технологических параметров системы глубинных пневмокомпенсаторов для плунжерных установок с погружным приводом, базирующийся на математическом моделировании гидродинамических процессов в лифтовых трубах с детальным учетом механизмов формирования нестационарных полей скорости потока и давления при откачке продукции.

2. На базе теоретических расчетов формирования скорости потока и давления в подъемных трубах погружных плунжерных установок, оборудованных пневмокомпенсаторами (ПК), проанализировано влияние технологических параметров ПК на эффективность сглаживания колебаний скорости и давления. Показано, что степень сглаживания пульсаций давления возрастает с увеличением объема газовых камер пневмокомпенсаторов, причем связь между двумя величинами (коэффициентом пульсации и суммарным объемом пневмокомпенсаторов) близка к гиперболической.

3. Показан нелинейный характер влияния давления зарядки, пневмокомпенсаторов на эффективность их работы. Чрезмерно высокое давление зарядки, так же как и чрезмерно низкое, оказывает отрицательное влияние на эффективность работы ПК. Оптимальное давление зарядки рекомендуется устанавливать равным минимальному давлению в НКТ в течение цикла откачки, т.е. сумме статического и минимального гидродинамического давления в НКТ при работе пневмокомпенсаторов.



4. Рассмотрены два предельных случая размещения системы пневмокомпенсаторов вдоль лифтовых труб. В варианте 1 пневмокомпенсаторы устанавливаются последовательно непосредственно на выкиде плунжерного насоса, в варианте 2 – равномерно вдоль подъемного лифта. Показано, что с точки зрения снижения колебаний скорости потока и давления на выкиде насоса и, соответственно, переменных нагрузок на плунжер, вариант 1 является более оптимальным, поскольку формирование скорости потока и давления в НКТ в варианте 1 обусловлено работой всей системы глубинных ПК, а в варианте 2 – работой только части ПК, расположенных ниже исследуемого сечения труб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зотов А.Н. Методы гашения колебаний давления на устье штанговых установок / А.Н.Зотов, Э.О.Тимашев, К.Р.Уразаков // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16. № 6. С. 56-64. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-6-56-64
2. Зотов А.Н. Моделирование работы пневмокомпенсатора с квазиулеевой жесткостью в установке электропогружного центробежного насоса / А.Н.Зотов, К.Р.Уразаков, Е.Б.Думлер // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 70-76. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.70
3. Математическое моделирование дробления грунта и многофазного течения бурового раствора при бурении скважин / Б.С.Григорьев, А.А.Елисеев, Т.А.Погарская, Е.Е.Торопов // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 16-23. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.16
4. Методика расчета параметров струйного насоса при совместной эксплуатации с ЭЦН / А.С.Топольников, К.Р.Уразаков, Р.И.Вахитова, Д.А.Сарачева // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. № 3. С. 134-146.
5. Насосная добыча высоковязкой нефти из наклонных и обводненных скважин / К.Р.Уразаков, Е.И.Богомольный, Ж.С.Сейтпагамбетов, А.Г.Газаров. М.: Недра, 2003. 303 с.
6. Новые технологии эксплуатации малодебитного и периодического фонда / Э.Ю.Вдовин, Л.И.Локшин, М.А.Лурье, А.Д.Коротаев, Э.О.Тимашев // Инженерная практика. 2017. № 11. С. 40-43.
7. Новый метод количественной диагностики технологических параметров штанговых установок решением обратных задач методами многомерной оптимизации / Р.Н.Бахтизин, К.Р.Уразаков, Э.О.Тимашев, А.Е.Белов // Нефтяное хозяйство. 2019. №7. С. 118-122. DOI: 10.24887/0028-2448-2019-7-118-122
8. Технология увеличения добычи нефти из малопродуктивных скважин / К.Р.Уразаков, Э.В.Абрамова, А.С.Топольников, Р.З.Миннигалимов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2013. №4. С. 201-211.
9. Тимашев Э.О. Динамика скорости потока и давления в лифтовых трубах установок плунжерных насосов с погружным приводом / Э.О.Тимашев, К.Р.Уразаков // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2019. № 4. С. 82-88. DOI: <http://10.17122/ntj-oil-2019-5-45-55>
10. Уразаков К.Р. Математическая модель штанговой установки с эжектором для откачки газа из затрубного пространства / К.Р.Уразаков, В.А.Молчанова, А.С.Топольников // Нефть. Газ. Новации. 2007. № 6. С. 54-60.
11. Уразаков К.Р. Механизированная добыча нефти: Сборник изобретений. Уфа: Нефтегазовое дело, 2010. 329 с.
12. Уразаков К.Р. Устьевой пневмокомпенсатор штанговой скважинной насосной установки / К.Р.Уразаков, Э.О.Тимашев, Р.С.Тухватуллин // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 12. С. 60-64.
13. Утечки жидкости в штанговом насосе с регулярным микрорельефом на поверхности плунжера / Р.Н.Бахтизин, К.Р.Уразаков, Б.М.Латыпов, Б.Х.Ишмухаметов // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 4. С. 33-39.
14. Brill J.P. Multiphase flow in wells / J.P.Brill, H.Mukherjee // Society of petroleum engineers. 1999. Vol. 214. P. 215.
15. Dynamic model of a Rod Pump Installation for inclined wells / R.N.Bakhtizin, K.R.Urazakov, S.F.Ismagilov, A.S.Topolnikov, F.F.Davletshin // SOCAR Proceedings. 2017. № 4. P. 74-82. DOI: 10.5510/OGP20170400333
16. Leonov E.G. Applied Hydroaeromechanics in Oil and Gas Drilling / E.G.Leonov, V.I.Isaev. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 474 p.
17. Pletcher R.H. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer / R.H.Pletcher, J.C.Tannehill. Washington: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 705 p.

Автор Э.О.Тимашев, канд. техн. наук, докторант, timashev@mail.ru (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия).

Статья поступила в редакцию 01.09.2019.

Статья принята к публикации 31.08.2020.