



## 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 гармоническое 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 малодебитного 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 гармоническое 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 пре-небрегается; 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.

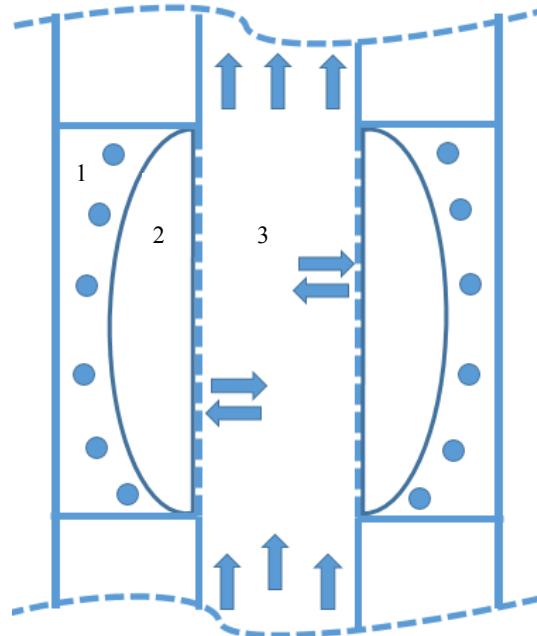


Рис.1. Схема пневмокомпенсатора  
1 – газовая камера; 2 – рабочая камера; 3 – полость НКТ (стрелками показаны возможные направления потоков)



**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]:

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

где  $\rho$ ,  $v$  – соответственно плотность, объемная доля и скорость откачиваемой смеси;  $l$  – длина пневмокомпенсатора;  $S$  – площадь внутреннего поперечного сечения труб;  $p$  – давление;  $\tau$  – касательные напряжения на стенке труб;  $\Pi$  – 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 полуцикле всасывания скорость жидкости на выкиде насоса изменяется по гармоническому закону, в такте нагнетания равна нулю; наличие источниковых 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/м<sup>3</sup>; сжимаемость жидкости 1500 МПа<sup>-1</sup>; температура на устье 20 °C; геотермический градиент 0,01 °C/м; длина хода 2,2 м; число качаний 10 мин<sup>-1</sup>; длина выкидной линии 1000 м.

Участок *ac* (рис.2, а) соответствует такту всасывания и поступательному движению жидкости и плунжера насоса вверх, а участок *cd* характеризует торт 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;  $\Delta P_i$ ,  $\Delta V_i$  – изменение давления и объема газовых камер соответственно. Задаваясь величиной желаемой амплитуды колебаний давления после сглаживания  $\Delta P_i$ , 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:

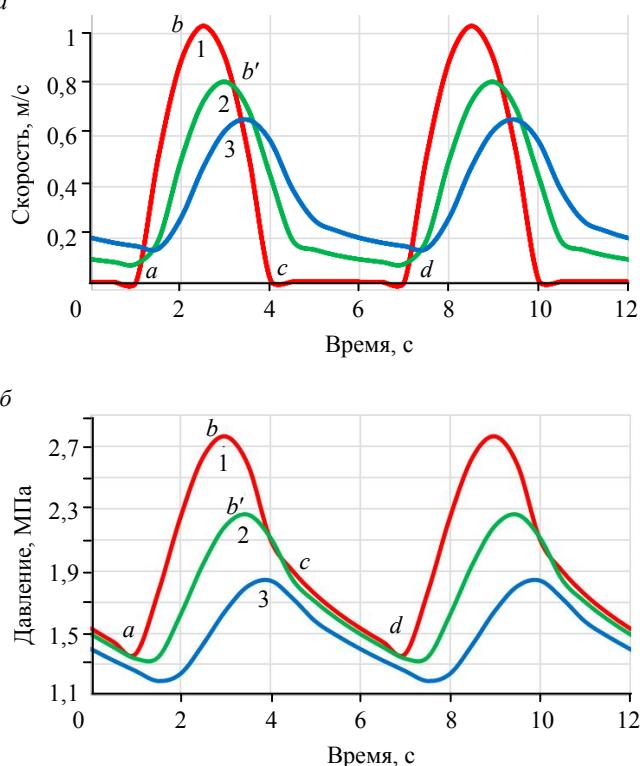


Рис.2. Скорость жидкости (а) и гидродинамическое давление жидкости (б) в НКТ  
1 – глубина 1000 м; 2 – 750 м, 3 – 500 м



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

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

Для выравнивания подачи плунжерного насоса необходимо, чтобы в период повышения скорости и давления в камере 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

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

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  $\Delta V_{pc}$ , 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  $t_1-t_2$

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

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 выкide 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 выкide 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,  $\Delta L_{pc}$  (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  $p_{\max}$ ,  $p_{\min}$ ,  $p_{\text{mid}}$  – 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 м<sup>3</sup> 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.

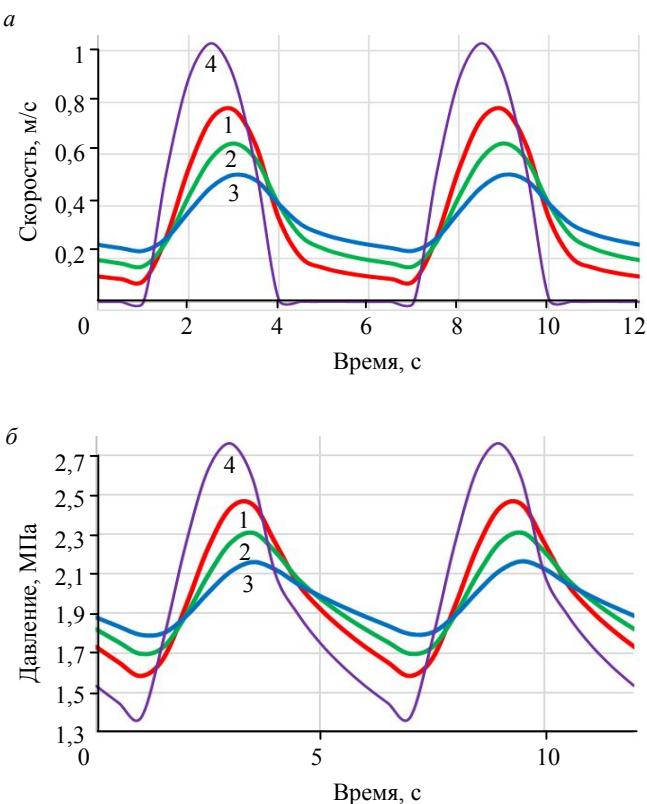


Рис.3. Динамика скорости потока (а) и гидродинамическое давление (б) в нижнем конце НКТ при различном суммарном объеме системы ПК  
1 – 50 л (14 ПК); 2 – 100 л (28 ПК); 3 – 200 л (55 ПК); 4 – без ПК

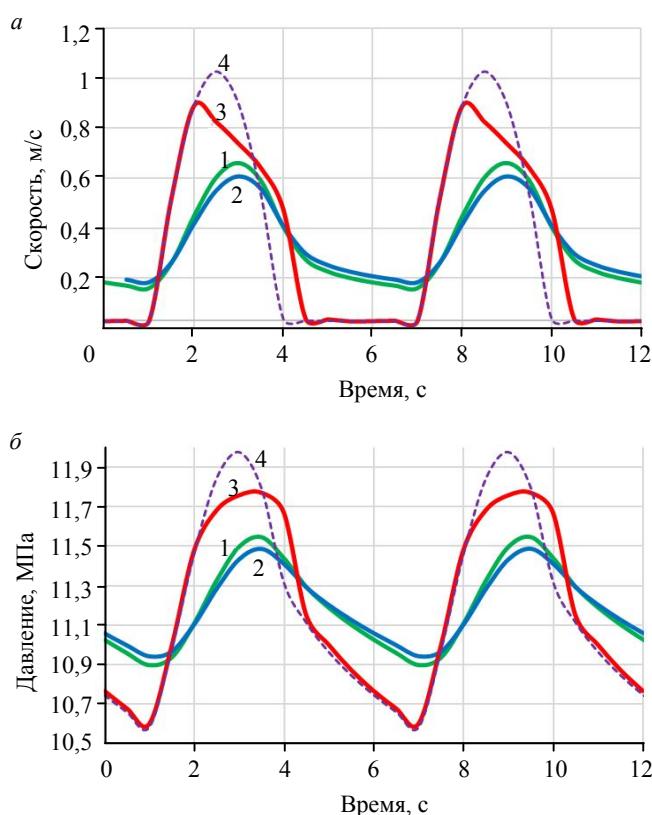


Рис.4. Динамика скорости потока (а) и давление (б) в нижнем конце НКТ при различном давлении зарядки  
1 – 5,3 МПа (8 МПа в скважинных условиях);  
2 – 7 МПа (10,5 МПа в скважинных условиях);  
3 – 7,6 МПа (11,5 МПа в скважинных условиях); 4 – без ПК

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 <sup>3</sup>	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



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 данном интервале снижается, что обусловлено снижением как гидростатической составляющей, так и потеря 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.

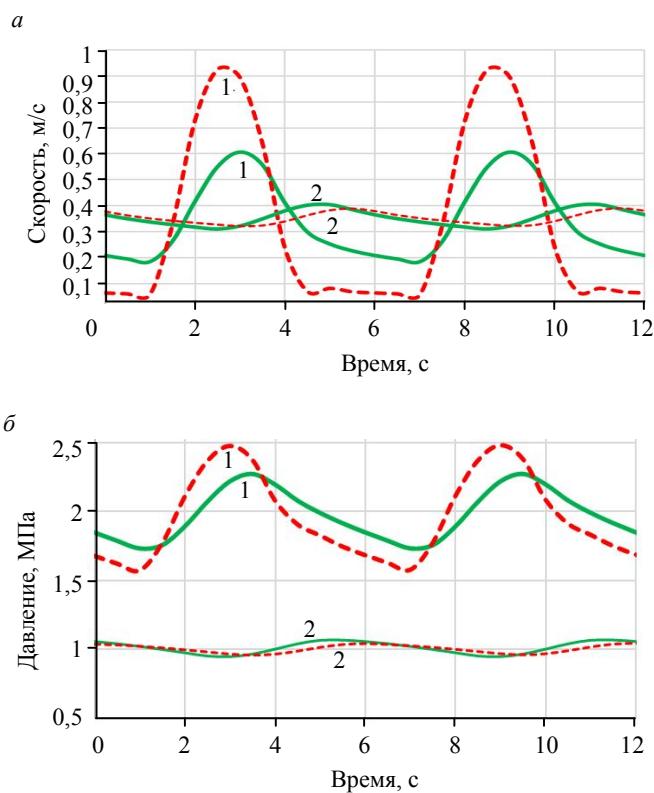


Рис.5. Динамика скорости потока (а) и гидродинамического давления (б) в нижнем конце НКТ

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 квазинулевой 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 бурowego 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. 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/OGP2017040033
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.