

Особенности математического моделирования процесса движения газожидкостной смеси в скважинах месторождения Юго-Восточный Камышитовый

Д.Ж. Ахмед-Заки¹, Б.К. Шеркешбаева²

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы

²Атырауский институт нефти и газа, Атырау

Аннотация

В работе рассматриваются геолого-физические характеристики и физико-гидродинамические свойства пород продуктивных пластов месторождения, эксплуатационных характеристик скважин, по свойствам газожидкостной смеси месторождения Юго-Восточный Камышитовый с учетом анализа течений в прискважинной зоне нефтяного пласта.

Основной задачей эксплуатации скважин является осуществление процесса подъема продукции скважин с наибольшей эффективностью и по возможности бесперебойно. Пусть заданы параметры: свойства добываемой жидкости, режима откачки, условия эксплуатации месторождения, ограничения на ресурсы эксплуатации. При этом наша задача заключалась в рациональной и оптимальной затрате разработке данного месторождения. Одним из путей разрешения поставленной задачи является правильный подбор (компоновка) добывающего оборудования при указанных параметрах режима откачки.

Все сведения, использованные в статье, анализ и рекомендации основаны на материалах полученных от НГДУ «Жайыкмунайгаз» Производственного филиала «Эмбамунайгаз».

При эксплуатации нефтяных скважин совместно с нефтью добывается и попутный газ, поэтому в большинстве случаев нефть и газ движутся совместно по одной эксплуатационной колонне, называемой лифтом или подъемником. Смесь определенного количества свободного газа с жидкостью будем называть газожидкостной смесью. Таким образом, при эксплуатации нефтяных скважин основным изучаемым объектом является газожидкостная смесь и условия ее движения от забоя до устья. Кроме того, изучаются и некоторые вопросы движения жидкости применительно к эксплуатации нефтяных скважин. Рассмотрим основные отличительные особенности газожидкостных смесей [1-3].

Процесс движения газожидкостной смеси в лифте связан не только с движением жидкой и газовой фаз относительно стенок трубы, но и с движением газовой фазы относительно жидкой.

Вопрос движения шарообразных тел в жидкости изучался многими исследователями. В частности, скорость движения круглого одиночного твердого тела в жидкости при малых числах Рейнольдса ($Re \ll 1$) определяется формулой Стокса. Эта же формула может быть применена для определения скорости всплывания газового пузырька малого размера в жидкости:

$$v_0 = \frac{2}{9}gR^2 \frac{(\rho_{ж} - \rho_{г})}{\mu} \quad (1)$$

Скорость всплывания газового пузырька для больших чисел может быть определена по формуле Левича В. Г.:

$$v_0 = \frac{1}{9} g R^2 \frac{(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma})}{\mu} \quad (2)$$

В общем, виде плотность ГЖС может быть записана в виде функциональной зависимости: $\rho'_{\text{см}} = \rho'_{\text{см}}(q_{\text{H}}, V, q_{\text{B}}, f, v_{\text{H}}^{\Gamma}, v_{\text{B}}^{\Gamma}, v_{\text{B}}^{\text{H}}, \rho_{\text{H}}, \rho_{\Gamma}, \rho_{\text{B}} \dots)$.

Баланс энергии в скважине. Основным процессом в добыче нефти является процесс подъема на дневную поверхность ГЖС от забоя скважины. Исходя из этого, можно сформулировать основную задачу эксплуатации скважин — осуществление процесса подъема продукции скважин с наибольшей эффективностью и по возможности бесперебойно. Этот процесс может протекать следующим образом:

1. За счет природной энергии нефтяной залежи, $W_{\text{П}}$.
2. За счет энергии, искусственно вводимой в нефтяную залежь или скважину с поверхности $W_{\text{И}}$.
3. За счет природной и искусственно вводимой энергии $W_{\text{П}} + W_{\text{И}}$.

Так как процесс движения продукции скважин от забоя до поверхности связан с определенными потерями, то сам процесс подъема возможен лишь при определенном соотношении энергии, которой обладает продукция скважины, и потерь энергии при ее движении.

Таким образом, суммарная природная энергия W_n жидкости $W_{\text{ж}}$ и газа $W_{\text{г}}$ в скважине выразится так:

$$W_n = 10^3 \int_{P_y}^{P_{\text{нас}}} \frac{dP}{\rho_1(P, T)} + 10^3 \int_{P_y}^{P_{\text{нас}}} \frac{dP}{\rho_1(P, T, G'_0)} + \frac{G'_0 P_0 T_y}{T_0} \times \left[\int_{0,2}^P \text{пр(нас)} z \frac{dP_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} - \int_{0,2}^P \text{пр}(y) z \frac{dP_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} \right] + \frac{G'_0 P_0 k}{T_0} P_{\text{п.кр}} \left[\int_{0,2}^P \text{пр(нас)} z dP_{\text{пр}} - \int_{0,2}^P \text{пр}(y) z dP_{\text{пр}} \right]. \quad (3)$$

Для подъема продукции на поверхность необходимо, чтобы: $W_n \geq W_{\text{Гс}} + W_{\text{Тр}} + W_y$. В случае, когда $W_n < W_{\text{Гс}} + W_{\text{Тр}} + W_y$, необходима дополнительная искусственно подаваемая энергия, W_u которую в случае использования, например, газа, можно разделить так:

$$W_u = \frac{R_0 P_0 T_y}{T_0} \left[\int_{0,2}^P \text{пр(нас)} z \frac{dP_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} - \int_{0,2}^P \text{пр}(y) z \frac{dP_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} \right] + \frac{R_0 P_0 k}{T_0} P_{\text{п.кр.}} \times \left[\int_{0,2}^P \text{пр(нас)} z dP_{\text{пр}} - \int_{0,2}^P \text{пр}(y) z dP_{\text{пр}} \right] + R_0 \rho_{\text{Г0}} \int_{P_y}^{P_{\text{В}}} \frac{dP}{\rho(P, T, G'_0)}, \quad (4)$$

С учетом выражения (4) уравнение (3) перепишем в виде:

$$W = W_n + W_u = 10^3 \int_{P_y}^{P_{\text{нас}}} \frac{dP}{\rho_1(P, T)} + 10^3 \int_{P_y}^{P_{\text{нас}}} \frac{dP}{\rho(P, T, G'_0)} + \frac{G'_0 P_0 T_y}{T_0} \left[\int_{0,2}^P \text{пр(нас)} z \frac{dP_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} - \int_{0,2}^P \text{пр}(y) z \frac{dP_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} \right] + \frac{G'_0 P_0 k}{T_0} P_{\text{п.кр.}} \left[\int_{0,2}^P \text{пр(нас)} z dP_{\text{пр}} - \int_{0,2}^P \text{пр(нас)} z dP_{\text{пр}} \right] + \frac{R_0 P_0 T_y}{T_0} \left[\int_{0,2}^P \text{пр(нас)} z \frac{dP_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} - \int_{0,2}^P \text{пр(нас)} z \frac{dP_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}} \right] + \frac{R_0 P_0 k}{T_0} P_{\text{п.кр.}} \times \quad (5)$$

$$\times \left[\int_{0,2}^P \text{пр(нас)} z dP_{\text{пр}} - \int_{0,2}^P \text{пр(нас)} z dP_{\text{пр}} \right] + R_0 \rho_{\text{го}} \int_{P_y}^{P_B} \frac{dP}{\rho(P, T, G'_0)}.$$

Если $P_y \geq P_{\text{нас}}$ ($G'_0 = 0$), то уравнение (3) упрощается и записывается в виде:

$$W = W_u = 10^3 \int_{P_y}^{P_{\text{нас}}} \frac{dP}{\rho_1(P, T)} \quad (6)$$

Это выражение соответствует случаю фонтанирования скважины за счет гидростатического напора пласта. Выражение (5) описывает баланс энергии при механизированном способе эксплуатации скважины (в данном случае путем ввода компримированного газа). Из существа вышеизложенного и из анализа уравнений (3), (5) и (6) видно, что гори в подъеме продукции скважины процесс, протекающий в подъемных трубах (скважине) одинаков и может быть описан единой теорией подъема жидкости, независимо от способа эксплуатации.

Анализ физики процессов протекающих в скважине показывает, что:

1. КПД подъема жидкости не зависит от высоты ее подъема и плотности жидкости.
2. Повышения КПД подъема заданного количества жидкости Q можно достигнуть снижением вязкости поднимаемой жидкости ν и увеличением диаметра подъемных труб.

Существование относительной скорости газа, как уже указывалось, вызывает увеличение плотности смеси, что в свою очередь, приведет к увеличению потребного напора для преодоления веса гидростатического столба смеси. Потребный напор увеличивается и вследствие преодоления сил трения.

Неустановившееся движение смеси в реальном подъемнике, связанное с расширением газа, приводит к возникновению инерционных потерь за счет ускоренного движения жидкости и газа. Все эти виды потерь зависят от объемных расходов жидкой и газовой фаз, их физико-химических свойств, структуры смеси и диаметра подъемника.

Рассмотрим некоторые пути изучения движения газожидкостной смеси в вертикальных трубах.

1. Газожидкостная смесь рассматривается как однородная система. Принимая закон Бернулли для единицы массы смеси, движущейся на участке трубы dH , при перепаде давления dP , можно записать уравнение:

$$\int_{P_2}^{P_1} v' dP + dH + d \left(\frac{v^2}{2g} \right) + dP_{\text{пот}} + dP_{\text{мех}} = 0,$$

Предполагая движение стационарным и однородным, получаем: $dP_{\text{мех}} = 0$; $d \left(\frac{v^2}{2g} \right) = 0$ или $\int_{P_2}^{P_1} v' dP + dH + dP_{\text{пот}} = 0$. Для получения численной величины $dP_{\text{пот}}$ необходимо использовать результаты экспериментального исследования движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах.

2. В практике изучения движения ГЖС в вертикальных трубах более часто используется уравнение баланса энергии (давлений). Пренебрегая потерями давления

на местных сопротивлениях на рассматриваемом участке, баланс энергии может быть представлен в следующей форме:

$$dP = \rho_{\text{см}} g dH + \left(\frac{dP}{dH} \right)_{\text{тр}} dH + \left(\frac{dP}{dH} \right)_{\text{ин}} dH \quad \text{или} \quad dP = \rho_{\text{см}} g dH + \left(\frac{dP}{dH} \right)_{\text{тр}} dH + \frac{MV}{f^2 \bar{P}} dP.$$

Анализ этого уравнения показывает, что практические расчеты невозможны без использования результатов эксперимента.

Теоретическое и экспериментальное изучение движения ГЖС по трубам вызывает большие затруднения, так как перепад давления на концах трубы зависит от многих факторов. Поэтому исследования проводились в двух направлениях: обрабатывались экспериментальные данные и были рекомендованы эмпирические зависимости (большинство авторов проводили работы в этом направлении), составлялись дифференциальные уравнения и затем выводились частные решения.

Предполагается, что все частицы воды представлены в виде упругих шаров, диаметр которых мал по сравнению с расстоянием между ними, но велик по сравнению с размерами молекул. Опыты, проведенные в исследованиях с эмульсиями первого типа ромашкинской нефти, показали, что при обводненности не более 15% формула Эйнштейна приемлема.

На вязкость эмульсии влияет также температура. Снижение температуры приводит к резкому повышению вязкости. Таким образом, при подъеме смеси по насосно-компрессорным трубам вязкость жидкой фазы (эмульсии) повышается за счет диспергирования фаз и снижения температуры. С целью уменьшения вязкости эмульсии, а следовательно, повышения эффективности работы газожидкостного подъемника, предлагается в скважину вместе с газом вводить различные деэмульгаторы, которые способствуют обращению фаз. Положительный эффект от такого воздействия можно получить при определенных минимальных объемных концентрациях воды, численное значение которой применительно к нефтяным эмульсиям не установлено.

При обработке экспериментальных или промысловых данных чаще всего исходят из того, что общие местные потери напора, выраженные отношением потерь напора в метрах к длине трубы, определяются суммой

$$\varepsilon = \frac{1}{\rho_{\text{ж}} g} \frac{dp}{dl} = \frac{1}{\rho_{\text{ж}} g} \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{см}} + \frac{1}{\rho_{\text{ж}} g} \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{ТР}} + \frac{1}{\rho_{\text{ж}} g} \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{ин}}. \quad (7)$$

Здесь первое слагаемое представляет перепад давления, потребный для преодоления веса столба смеси. Второе – давление, затрачиваемое на гидравлические сопротивления. Третье учитывает изменение кинетической энергии. Многие авторы считают, что третье слагаемое мало по сравнению с общей суммой, и поэтому его не учитывают. Чаще всего при работе фонтанных скважин наибольшее значение имеет первое слагаемое. Точность расчетных формул определяется в первую очередь этим слагаемым. По физическому смыслу оно является отношением плотности смеси к плотности жидкости.

$$\frac{1}{\rho_{\text{ж}} g} \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{см}} = \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_{\text{ж}}} = 1 - \varphi + \frac{\rho_{\text{Г}}}{\rho_{\text{ж}}} \varphi, \quad \text{где} \quad \varphi = \frac{\beta}{1 + \frac{c_{\text{П}}}{A_{\text{ПР.Г}}} \beta}.$$

Наличие относительной скорости ($c_{\text{П}} > 0$) приводит к увеличению плотности смеси.

В расчетах можно принять, что $\rho_{\Gamma}/\rho_{\text{ж}} \ll 1$, поэтому $\frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_{\text{ж}}} = 1 - \beta + \frac{\alpha_0 \beta^2}{1 + \alpha_0 \beta}$.

Для расчета потерь напора на трение предложен ряд формул. В большинстве случаев ГЖС рассматривают как однородную гипотетическую среду с фиктивной вязкостью или считают, что вязкость смеси равна вязкости жидкой фазы. Некоторые авторы при вычислении числа Re исходят из абсолютной вязкости жидкой фазы или принимают ее равной единице.

Потери напора на трение при движении смеси можно определять по формуле Дарси— Вейсбаха $\frac{1}{\rho_{\text{ж}} g} \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{ТР}} = \lambda_c \frac{c_{\text{см}}^2}{2gD} \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho_{\text{ж}}}$.

На основе опытных данных с воздуховодяной смесью, полученных на трубах диаметром 2,6 см, А. А. Арманом рекомендовано следующее выражение: $\frac{1}{\rho_{\text{ж}} g} \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{ТР}} = \frac{1}{\rho_{\text{ж}} g} \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{ТР0}} (1 - \varphi)^{-1,53}$, при $\varphi \leq 0,8$, где $\frac{1}{\rho_{\text{ж}} g} \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{ТР0}}$ — потери напора на трение при движении только жидкости. Отсюда $\lambda_c = \lambda_{\text{ж}} \frac{q^2}{(q+v)^2} \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_c} (1 - \varphi)^{-1,53}$. Если пренебречь массой газа, то $\lambda_c = \lambda_{\text{ж}} (1 + \alpha)^{-2} (1 - \varphi)^{-2,53}$.

Согласно Дансу – Росу для пузырьковой и снарядной форм течения потери напора на трение определяются соотношениями:

$$\frac{1}{\rho_{\text{ж}} g} \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{ТР}} = 4f_{\text{ТР}} \frac{c_{\text{ПР.Ж}}^2}{2gD} \left(1 + \frac{c_{\text{ПР.Г}}}{c_{\text{ПР.Ж}}} \right), \quad \frac{1}{\rho_{\text{ж}} g} \left(\frac{dp}{dl} \right)_{\text{ТР}} = 4f_{\text{ТР}} \frac{q^2}{2gF^2 D} \left(1 + \frac{v}{q} \right)$$

где $f_{\text{ТР}} = f_1 \frac{f_2}{1 + 0,141 f_1 \sqrt{\frac{v}{q}}}$.

Определение величин f_1 и f_2 по графикам нередко приводит к большим погрешностям. Для практически гладких труб (когда относительная шероховатость порядка 0,00001) коэффициент f_1 можно с точностью до 10% рассчитывать по формуле $f_1 = 0,11 Re^{-0,266}$.

Так как при движении только жидкости $f_2 = 1$, то $\lambda_c = \lambda_{\text{ж}} = 4f_1 = \frac{1,39}{Re^{0,016}} \lambda_0$, где λ_0 — коэффициент гидравлических сопротивлений по Блазиусу для гладких труб.

Множитель $1,39 Re^{-0,016}$ изменяется от 1,24 до 1,07 ($Re = 10^3 \div 10^7$). В среднем $4f_1$ больше, чем по Блазиусу, на 16%.

Коэффициент f_2 можно выразить следующим образом. При $0,5 \leq A_0 \leq 5,0$ $f_2 = 0,826/\sqrt{A_0} - 0,033$, где $A_0 = f_1 \frac{v}{q} D_0^{\frac{2}{3}}$. Если $A_0 < 0,5$, то $f_2 = 1$; при $A_0 > 5,0$ значение $f_2 = 0,2$.

Девис (1963 г.), анализируя экспериментальные данные по движению ГЖС по вертикальным трубам, пришел к выводу, что сопротивления движению смеси намного выше, чем для однофазного потока, по следующим причинам:

- 1) вследствие потерь энергии за счет тормозящего действия жидкой фазы на газовую (ввиду наличия относительной скорости);
- 2) наличия свободного газа, которое приводит к уменьшению площади сечения трубы, занятого жидкой фазой.

При движении ГЖС по вертикальным трубам предлагается применить параметр, сопоставляющий влияние сил тяжести и вязкости, определяемый выражением $\frac{Re'}{Fr} = \frac{2g\rho_{\text{см}}LD}{\theta D + 2\mu_{\text{см}}c_{\text{см}}} = A_0$. Если $Re' = E$, то $\frac{E}{Fr} = \frac{2g\rho_{\text{см}}L}{\theta} = A'_0$.

От ранее рассмотренного такой подход к изучению движения ГЖС принципиально отличается. В нефтяных скважинах (особенно высокодебитных), по всей вероятности,

в большинстве случаев ГЖС представлена в виде высокодисперсной системы, поэтому предельное напряжение сдвига должно быть значительным [4].

Накопленный и обработанный в безразмерных параметрах фактический материал позволит установить пригодность соотношений, рекомендуемых различными авторами. Применительно к нефтяным скважинам на практике наиболее распространено уравнение акад. А. П. Крылова:

$$\varepsilon = \frac{1}{\rho_{жг}} \frac{dp}{dl} = \frac{q + a}{q + a + v} + cv^2 + mvq + eq^{1,75}, \quad (8)$$

где v и q — объемные расходы газа и жидкости в м³/с. Коэффициенты a , c , m , e зависят от диаметра трубы, причем m и e — еще и от вязкости жидкости.

В результате обработки экспериментальных данных были получены следующие соотношения: $q_{\max} = 55D^3\varepsilon^{1,5}$, $v_{\max} = 15,5D^{2,5}\varepsilon^{-0,5}$, $q_{\text{опт}} = q_{\max}(1 - \varepsilon)$, $v_{\text{опт}} = v_{\max}(1 - \varepsilon)^2$.

Считая справедливым эти соотношения для труб большой длины, рекомендуется в расчетах принимать средний градиент: $\varepsilon = \frac{p_1 - p_2}{L\rho_{жг}}$ и исходить из среднего объемного расхода газа в предположении изотермического расширения идеального газа, т. е. $v_{\text{ср}} = \frac{v_0 p_0 \ln(p_1/p_2)}{p_1 - p_2}$ где v_0 — объемный расход газа при средней температуре в насосно-компрессорных трубах (НКТ) и при нормальном давлении, для начальной точки ($q = 0$) градиент $\varepsilon = \frac{a}{a+v} + cv^2$. Расчеты показывают, что второе слагаемое в правой части этого уравнения значительно меньше первого, поэтому им можно пренебречь. Для идеального газа

$$v_0 = \frac{a[\rho_{жг}L - (p_1 - p_2)]}{p_0 \ln(p_1/p_2)}. \quad (9)$$

Сумма последних трех слагаемых в (8) представляет собою потери напора на трение. Первое слагаемое — отношение плотности смеси к плотности жидкости.

Таким образом, согласно уравнению А. П. Крылова для различных диаметров труб, расходов жидкости и газа средняя скорость всплытия пузырьков остается неизменной и равной 1 м/с.

Одни допущения приводят к завышению расчетных величин, другие — к занижению их, поэтому в целом расчетные величины могут соответствовать реальным.

Уравнение (8) не учитывает многих факторов, влияющих на законы движения нефти с растворенным и свободным газом, но оно позволяет достаточно просто решить ряд задач без применения сложной вычислительной техники.

Между величинами, рассчитанными по формулам А.П. Крылова, и фактически данными в некоторых случаях наблюдаются большие расхождения. Это вызвано следующими причинами. Во-первых, расчеты основаны на том, что изменение состояния газа подчиняется законам идеальных газов. Допущение можно исключить, если в расчетах основываться на уравнении (8) и при определении v учитывать коэффициент сжимаемости реального газа. Во-вторых, было принято, что давление по длине труб изменяется по линейному закону. Это допущение также можно устранить, если расчеты производить ступенями по отдельным участкам труб. В-третьих, при обработке опытных данных было принято, что при постоянном диаметре трубы между суммарным объемным расходом газа и жидкости и линейной скоростью газа существует линейная зависимость. Это условие выполняется, когда $v + q > 0,003 \div 0,005$ м³/с, т.е. для высокодебитных скважин с большим газовым числом.

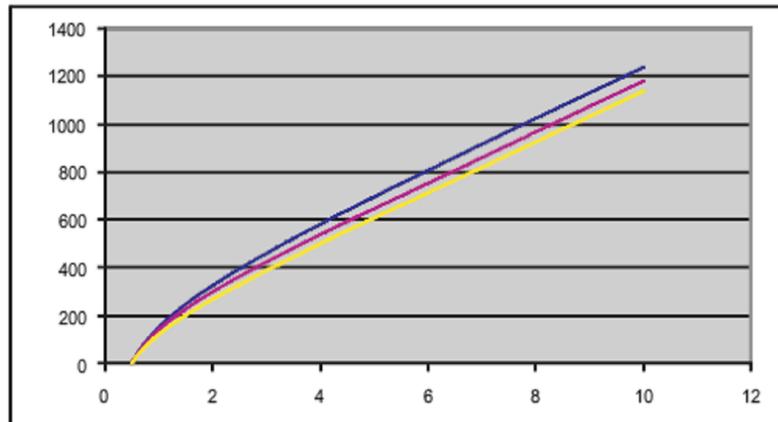


Рис. 1: Распределение давления в скважине исходные параметры $P_{заб}=100$ атм., $P_{пл}=105$ атм., $P_{нас}=50$ атм., $T_{пл}=65$ С, $Q_{жид}=10$ м³/сут, обводненность продукции составляет – 57%.

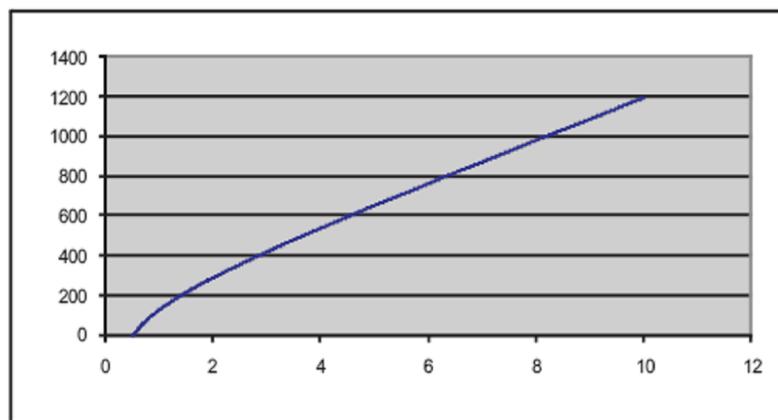


Рис. 2: Распределение давления в скважине при $P_{заб}=100$ атм., $P_{пл}=105$ атм., $P_{нас}=85$ атм., $T_{пл}=65$ С, $Q_{жид}=10$ м³/сут, обводненность продукции составляет – 57%.

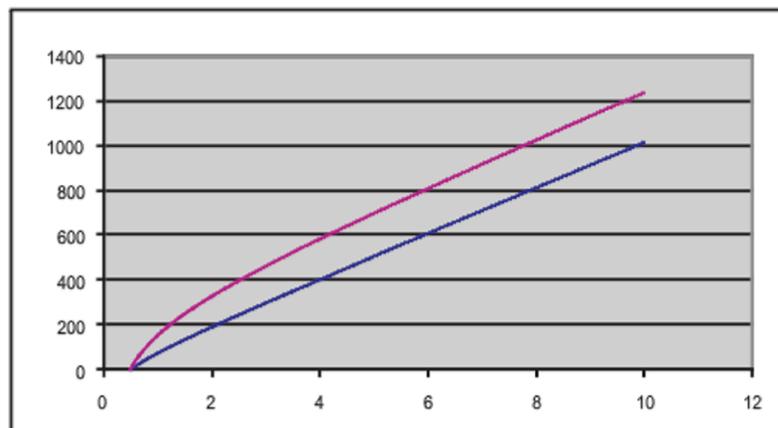


Рис. 3: Распределение давления в скважине при $P_{заб}=100$ атм., $P_{пл}=105$ атм., $P_{нас}=85$ атм., $T_{пл}=65$ С, $Q_{жид}=25$ м³/сут, обводненность продукции составляет – 15%; – 90%.

Исследование и результаты численных расчетов на основе моделей подобных (8) и данных Юго-Восточный Камышитовый представлены на рисунках 1-3.

Таким образом, рассмотрены физические процессы подъема жидкости, влияние основных параметров (дебета скважины, глубины, обводненности продукции, изменения забойного и пластового давлений, наличие примесей) на характер движения жидкости в вертикальной трубе (скважине).

Литература

- [1] *Жумагулов Б.Т., Зубов Н.В., Монахов В.Н., Смагулов Ш.С.* Компьютерные технологии в нефтедобыче. Алматы: Гылым, 1996. – 167 с.
- [2] *Гиматутдинов Ш.К.* Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений. Москва: Недра, 1983 – 615 с.
- [3] *Мищенко И.Т.* Расчеты в добыче нефти. Москва: Недра, 1989 г.–317 с.
- [4] *Шеркешбаева Б.К., Ахмед-Заки Д.Ж.* Моделирование течения жидкости в добывающей скважине и расчет глубины спуска насоса // Проблемы механики. Самарканд, (в печати).