


Эксплуатация нефтяных и газовых скважин

«Расчет фонтанного подъемника. Условие
совместной работы системы «пласт-
скважина»»

*Баландин Л.
Н.*





Расчет фонтанного подъемника

Дебиты фонтанных скважин изменяются в широких пределах как по количеству жидкости, так и по количеству попутного газа. С одной стороны, известны фонтанные скважины, дающие более 1000 м³/сут нефти. С другой стороны, есть фонтанные скважины с дебитом порядка 5 м³/сут. Для обеспечения фонтанирования все скважины оборудуются фонтанными трубами (НКТ), которые спускаются в скважину обычно до забоя и с помощью которых осваиваются фонтанные скважины и вызывают приток в них. При наличии в скважине труб возможны различные промывки, воздействие на забой (кислотные обработки, ГРП и пр.), замена одной жидкости другой, продавка скважины газом, задавка скважины путем закачки тяжелой жидкости (соленого или глинистого раствора) и другие операции, необходимость в которых возникает на разных этапах эксплуатации данной скважины и нефтяного месторождения в целом.

Однако для подобных операций существует очень ограниченный по диаметру набор труб. Это трубы следующих условных диаметров: 48, 60, 73, 89 и 102 мм. Однако из этих размеров эксплуатационных труб трубы диаметром 48 и 102 мм почти не употребляются. Наиболее употребительными (примерно 85%) являются трубы диаметром 73 мм. Лишь для фонтанных скважин, имеющих дебит несколько сот метров кубических в сутки, применяются 89 мм трубы. Можно сказать, что выбор диаметра фонтанных труб определяется не дебитом скважины, а удобством и техническими условиями нормальной эксплуатации таких фонтанных скважин. Периодически в скважины приходится спускать различные приборы для исследования, такие как скважинные термометры, манометры и дебитометры. Возникает необходимость спуска пробоотборников для отбора проб жидкости в самом забое скважины.

Все эти приборы имеют внешний диаметр порядка 40 мм, и для их свободного спуска до забоя, не прекращая при этом работу скважины, необходимо иметь внутренний диаметр труб не менее 73 мм. Наконец, широкое применение 73-мм труб обусловлено и тем, что эксплуатация фонтанных скважин, как правило, сопровождается отложением парафина на внутренних стенках труб, для удаления которого часто применяются механические скребки, спускаемые на стальной проволоке в фонтанные трубы через лубрикатор. Несмотря на то что диаметр фонтанных труб принимается почти всегда без расчета, вопрос о пропускной способности фонтанных труб или о подаче фонтанного подъемника при тех или иных условиях на забое и на устье скважины представляет безусловный интерес и требует своего ответа.

Всякий фонтанный подъемник работает при том или ином относительном погружении

$$\varepsilon = \frac{P_6 - P_y}{\rho \cdot g \cdot L}$$

Обычно эти значения лежат в пределах 0,3 - 0,65. Для условия $0,3 < \varepsilon < 0,65$ к. и. д. подъемника при его работе на оптимальном ($q_{\text{опт}}$) и максимальном (q_{max}) режимах мало отличаются друг от друга. Поэтому следует стремиться к тому, чтобы фонтанный подъемник работал в промежуточном режиме между $q_{\text{опт}}$ и q_{max} . Работа вблизи точки q_{max} отличалась наибольшей устойчивостью. Как было уже сказано, в этом режиме $dq / dV = 0$, т.е. изменение дебита при изменении расхода газа почти не происходит. Работа вблизи точки $q_{\text{опт}}$ характеризуется некоторой неустойчивостью, проявляющейся в пульсации работы фонтанного подъемника. Это объясняется тем, что небольшим случайным изменениям расхода газа соответствуют значительные изменения дебита ($dq / dV > 0$).

Это послужило основанием А. П. Крылову рекомендовать для практического использования простые формулы для определения подачи газожидкостного подъемника для этих основных двух режимов работы:

$$q_{\max} = 55 \cdot d^3 \cdot \left(\frac{P_6 - P_y}{\rho \cdot g \cdot L} \right)^{1,5} \left[\frac{\text{М}^3}{\text{с}} \right] \quad (1)$$

Поскольку А. П. Крыловым установлено, что $q_{\text{опт}} = q_{\max} (1 - \varepsilon)$, то подача на режиме наивысшего к. п. д. будет

$$q_{\text{опт}} = 55 \cdot d^3 \cdot \left(\frac{P_6 - P_y}{\rho \cdot g \cdot L} \right)^{1,5} \cdot \left(1 - \frac{P_6 - P_y}{\rho \cdot g \cdot L} \right) \left[\frac{\text{М}^3}{\text{с}} \right] \quad (2)$$

Если $P_6 > P_{\text{нас}}$, то в формулы (1) и (2) необходимо подставить вместо P_6 давление насыщения $P_{\text{нас}}$, а вместо L расстояние $L_{\text{нас}}$ от устья до точки, где давление равно $P_{\text{нас}}$. Формулы можно решить относительно диаметра d . Соответственно из (1) получим

$$d = \sqrt[3]{\frac{q_{\max}}{55} \cdot \left(\frac{\rho \cdot g \cdot L}{P_6 - P_y}\right)^{1,5}} \quad [\text{м}] \quad (3)$$

и из формулы (2)

$$d = \sqrt[3]{\frac{q_{\text{опт}}}{55} \cdot \left(\frac{\rho \cdot g \cdot L}{P_6 - P_y}\right)^{1,5} \cdot \left(1 - \frac{P_6 - P_y}{\rho \cdot g \cdot L}\right)^{-1}} \quad [\text{м}] \quad (4)$$

По этим формулам определяется диаметр фонтанных труб, необходимый для обеспечения в одном случае максимальной подачи [формула (3)], а в другом - оптимальной [формула (4)] при прочих заданных условиях (P_6 , P_y , L , ρ). Заметим, что формулы (1) и (2) определяют не дебит фонтанной скважины, а только пропускную способность фонтанных труб при заданных условиях. Для правильного согласования работы фонтанного подъемника с работой пласта необходимо, чтобы приток жидкости из пласта в скважину, который определяется формулой притока, равнялся бы пропускной способности фонтанного подъемника при одном и том же давлении на забое P_6 или давлении у башмака P_6 .

Расчет фонтанного подъемника с использованием приведенных выше формул сводится к определению для проектируемой скважины максимальной и оптимальной подач. Планируемый дебит скважины, определяемый формулой притока, должен лежать в пределах между q_{\max} и $q_{\text{опт}}$. Это гарантирует высокий к. п. д. газожидкостного подъемника и устойчивую его работу. Такой подход к расчету оптимизирует работу фонтанного подъемника для текущих условий, но не учитывает возможных изменений условий фонтанирования во времени. Обычно с течением времени условия фонтанирования ухудшаются: растет обводненность, пластовое давление падает, эффективный газовый фактор уменьшается, коэффициент продуктивности также уменьшается. Поэтому, планируя фонтанную эксплуатацию, рекомендуют рассчитывать фонтанные подъемники по максимальной подаче для начальных условий и по оптимальной - для условий конца периода

Дебит фонтанной скважины определяется совместной работой пласта и фонтанного подъемника; причем законы, управляющие работой пласта, одни, а законы, управляющие процессом движения ГЖС в фонтанных трубах, - другие. Совершенно очевидно, что увеличение давления на забое P_c снижает приток жидкости из пласта. С другой стороны то же увеличение P_c (или P_b) увеличивает подачу фонтанного подъемника. Поэтому если пропускная способность фонтанного подъемника меньше притока, избыточная жидкость будет накапливаться в скважине. В результате давление P_c будет расти. Это повлечет за собой увеличение подачи подъемника, с одной стороны, и снижение притока - с другой. Установившаяся работа этой системы пласт - скважина наступает тогда, когда приток сравняется с отбором.

Этой установившейся работе системы пласт - скважина будет соответствовать некоторое давление на забое P_c , которое может быть найдено из условия равенства притока и подачи фонтанного подъемника.

Как известно, приток определяется формулой

$$q_{\text{п}} = K \cdot (P_{\text{пл}} - P_{\text{с}})^n \quad (5)$$

Пропускная способность подъемника па режиме максимальной подачи определяется формулой (1). Если трубы спущены до забоя, то $P_{\text{б}} = P_{\text{с}}$. Если они подняты выше так что $L < H$, то

$$P_{\text{с}} = P_{\text{б}} + (H - L) \cdot \rho \cdot g \quad (6)$$

С учетом (5) формула (6) перепишется так:

$$q_{\text{п}} = K \cdot [P_{\text{пл}} - P_{\text{б}} - (H - L) \cdot \rho \cdot g]^n \quad (7)$$

Приравнивая правые части формулы притока (7) и формулы пропускной способности подъемника (1), получим

$$q_n = K \cdot [P_{пл} - P_6 - (H - L) \cdot \rho \cdot g]^n = 55 \cdot d^3 \cdot \left(\frac{P_6 - P_y}{\rho \cdot g \cdot L} \right)^{1,5} \quad (8)$$

Равенство (8) удовлетворяется при определенном значении P_6 , так как остальные величины задаются. Левая часть равенства (8) с ростом P_6 уменьшается нелинейно. Правая часть возрастает по параболе в степени 1,5. Пересечение этих двух кривых дает такое значение P_6 , при котором равенство (8) удовлетворяется. Решение равенства (8) получается либо путем подбора P_6 , либо графоаналитическим путем подобно тому, как это делалось при определении минимального давления фонтанирования.

Затем определяется соответствующий дебит скважины путем подстановки найденного значения P_6 либо в (7), либо в (1).

Найденный таким образом, дебит, отвечающий совместной работе пласта и фонтанного подъемника, соответствует работе фонтанного подъемника при режиме максимальной подачи. Аналогично можно найти дебит подъемника на режиме оптимальной подачи. Для этой цели необходимо приравнять правые части формулы притока (7) и формулы оптимальной подачи (2):

$$q_n = K \cdot [P_{пл} - P_6 - (H - L) \cdot \rho \cdot g]^n = 55 \cdot d^3 \cdot \left(\frac{P_6 - P_y}{\rho \cdot g \cdot L} \right)^{1,5} \cdot \left(1 - \frac{P_6 - P_y}{\rho \cdot g \cdot L} \right) \quad (9)$$

Из равенства (9) подбором или нахождением точки пересечения двух кривых, соответствующих левой и правой части уравнения, определяется сначала давление P_b , а потом по формуле притока - соответствующий дебит скважины, удовлетворяющий условию совместной работе пласта и фонтанного подъемника на режиме оптимальной производительности. Если выделение газа начинается не на забое, а в фонтанных трубах, как известно, в равенства (8) и (9) вместо P_b необходимо подставлять давление насыщения $P_{нас}$ и вместо длины труб L - глубину начала выделения газа $L_{нас}$.

Однако в этом случае для решения уравнения (9) варьировать величиной $P_b = P_{нас}$ нельзя, так как она постоянна. Решение достигается подбором такой величины $L = L_{нас}$, которая делает правую и левую части (9) равными. Аналогично следует поступить и при решении уравнения (8) для согласования работы пласта и подъемника, работающего на режиме максимальной производительности в случае, если газ начинает выделяться внутри НКТ. Поскольку $P_{нас}$ постоянно, равенство правой и левой частей (8) достигается подбором.

На рис. 1 показано определение забойных давлений P_c и соответствующих им дебитов при согласованной работе пласта и фонтанного подъемника на режимах максимальной и оптимальной производительности путем графоаналитического решения уравнений (8) и (9).

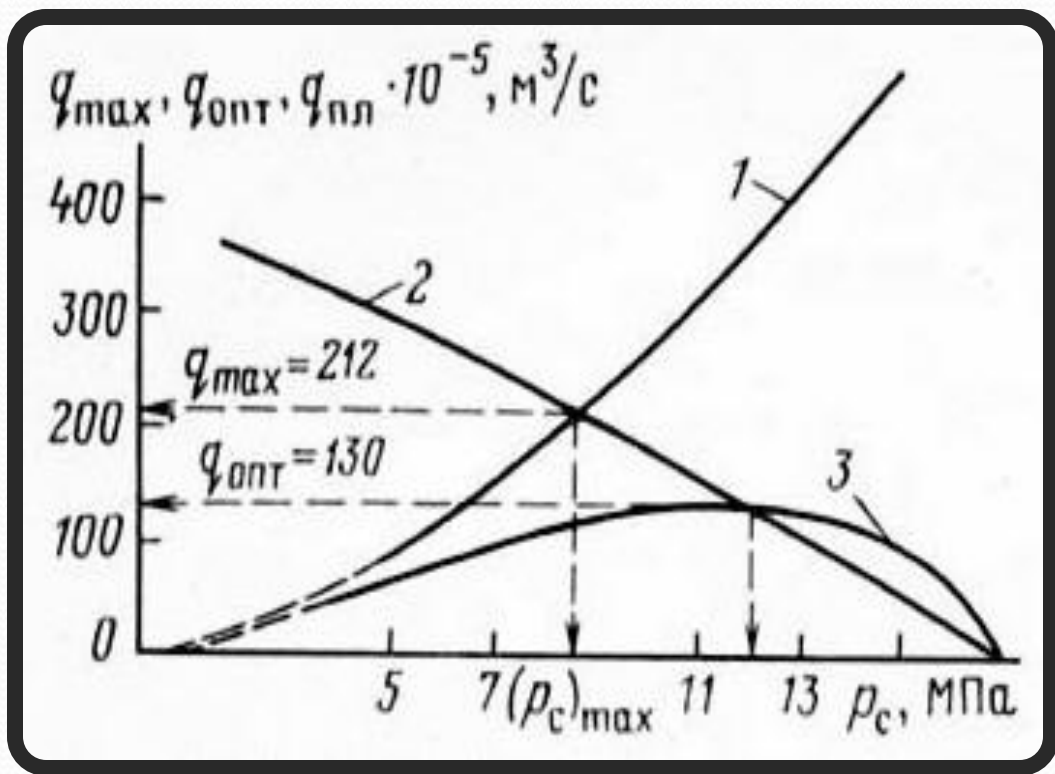


Рис. 1. Графоаналитическое определение условий совместной работы пласта и газожидкостного подъемника:

1 - зависимость подачи подъемника от давления у башмака РБ на режиме максимальной производительности;

2 - зависимость притока от давления РБ;


3 - зависимость подачи подъемника от РБ на режиме оптимальной производительности

Показанные на рис. 1 графики построены для следующих исходных данных:

$$P_{\text{пл}} = 170 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad P_y = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}; \quad P_6 = P_c; \quad L = H = 2000 \text{ м};$$
$$\rho = 900 \text{ кг/м}^3; \quad d = 0,0503 \text{ м (5,03 см)};$$
$$K = 3,588 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{Па} \cdot \text{с}; \quad n = 0,92;$$

P_6 изменяется от $150 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до $50 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

На оси абсцисс графика отложено давление на забое P_c' или P_6 , так как $L = H$ (башмак на забое). На оси ординат отложена максимальная q_{max} , оптимальная $q_{\text{опт}}$ подачи и приток жидкости из пласта $q_{\text{п}}$. Как видно из рисунка, согласование работы пласта и подъемника происходит при давлении на забое $P_c = 8,55 \text{ МПа}$ (пересечение линий 1 и 2) на режиме максимальной подачи, при этом дебит скважины $q_{\text{max}} = 212 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ($183,2 \text{ м}^3/\text{сут}$) и при давлении на забое $P_c = 12,1 \text{ МПа}$ (пересечение линий 2 и 3) на режиме оптимальной подачи при дебите $q_{\text{опт}} = 130 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ($112,3 \text{ м}^3/\text{сут}$).



**Расчет процесса
фонтанирования с помощью
кривых распределения
давления**

Умение рассчитывать при любых заданных условиях кривую распределения давления вдоль НКТ при движении по ним газожидкостной смеси позволяет по-новому подойти к расчету процесса фонтанирования, выбора диаметра труб и режима в целом. Использование кривых распределения давления $P(x)$ при проектировании и анализе фонтанной эксплуатации (а также других способов эксплуатации скважин) позволяет решить ряд новых задач, недоступных при использовании прежних расчетных методов. Далее будем исходить из того, что при любых заданных условиях кривая распределения давления $P(x)$ в НКТ может быть определена и построена любыми возможными методами.

Заметим, что для проектирования или для анализа фонтанной эксплуатации не требуется распределение давления $P(x)$ вдоль всей длины НКТ. Достаточно знать забойное или башмачное давление, соответствующее данному забойному давлению, давление на устье при заданных параметрах работы скважины или наоборот, устьевое давление и соответствующее давление на забое при заданных параметрах работы скважины.

Однако поскольку простых и надежных формул (кроме формул А. П. Крылова), связывающих устьевое и забойное давления при прочих заданных условиях, нет, то приходится прибегать к численному интегрированию процесса движения ГЖС по трубе, т. е. расчету по шагам. При таком решении неизбежно получаются значения давлений в промежуточных точках между устьем и забоем, использование которых необязательно. Рассмотрим для начала простейший случай, когда задан дебит скважины Q и соответствующее этому дебиту забойное давление P_c . Отметим, что во всех случаях проектирования процесса эксплуатации скважины любым способом знание уравнения притока или индикаторной линии обязательно. В противном случае любой инженерный расчет становится невозможным, если не говорить о предположительных оценках возможных показателей работы скважины. Итак, если задан дебит, то по индикаторной линии или по уравнению притока определяется соответствующее этому дебиту давление на забое скважины.

В отношении фонтанных труб уже указывалось, что их диаметр выбирается из соображений технологических условий и возможности спуска в скважину глубинных приборов для различных исследований. Можно сказать, что для подавляющего числа случаев это будут либо трубы диаметром $d = 60$ мм, либо $d = 73$ мм. Лишь для редких случаев, когда ожидаемые отборы могут достигать нескольких сот $\text{м}^3/\text{сут}$, можно говорить о целесообразности использования труб $d = 89$ мм. Во всяком случае для последующего расчета диаметром НКТ задаемся.

Зная дебит, газовый фактор, плотность нефти, воды и обводненность продукции, а также другие данные, такие как температура и ее распределение по стволу скважины, объемный коэффициент нефти (жидкости), необходимые для расчета, строим кривую распределения давления $P(x)$, начиная от точки с известным давлением P_c на забое скважины (рис. 2).

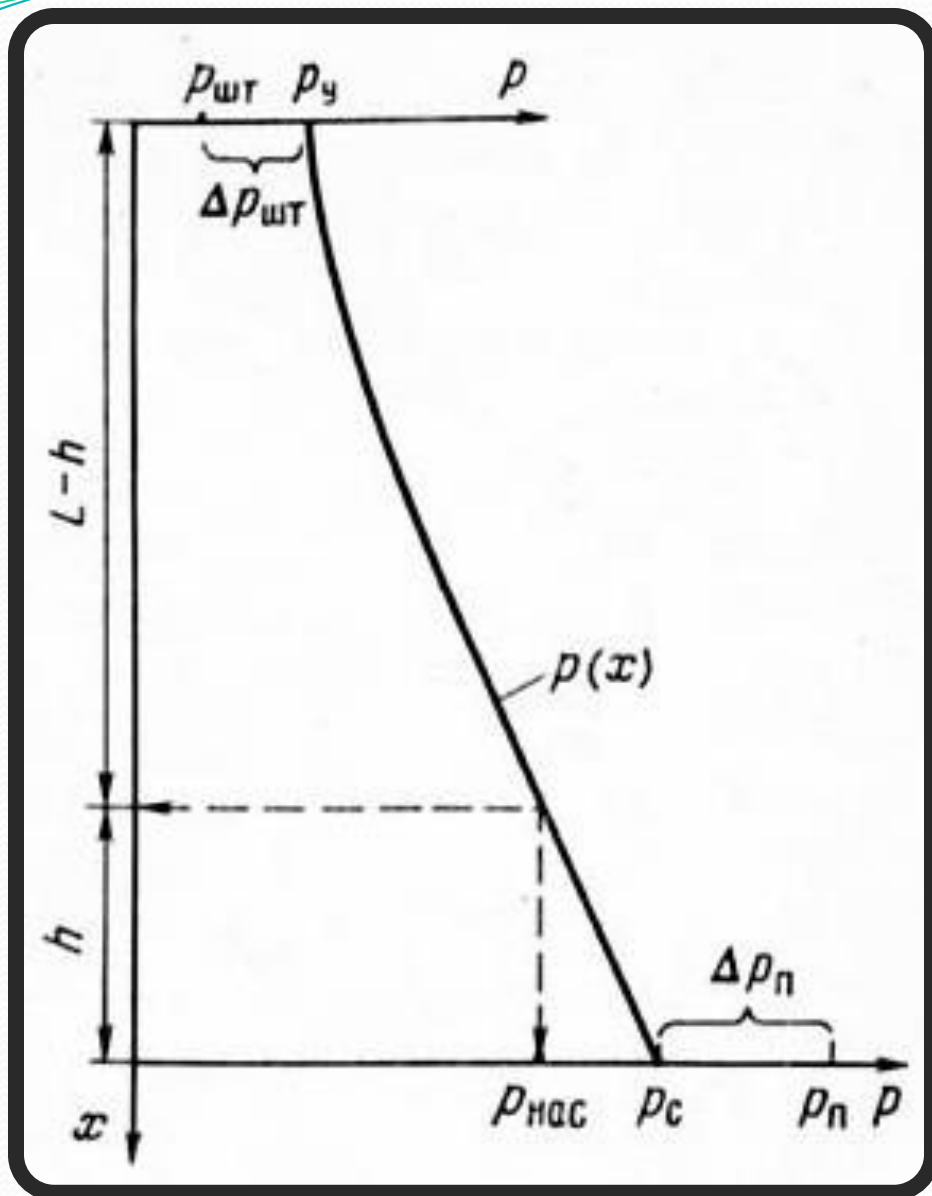


Рис. 2. Построение кривой распределения давления в фонтанных трубах по методу «снизу вверх» и определение давления на устье

При этом могут возникнуть разные условия расчета, которые необходимо учитывать.

а. Башмак НКТ находится непосредственно на забое скважины, так что $P_c = P_b$.

б. Башмак НКТ находится выше забоя на некотором расстоянии $a = H - L$, так что $P_b < P_c$.

в. Давление на забое или у башмака больше давления насыщения, т. е. $P_c = P_b > P_{нас}$.

г. Давление на забое меньше давления насыщения, т. е. $P_c < P_{нас}$.

Возможны также сочетание условия "а" с условиями "в" или "г", а также условия "б" с теми же "в" или "г". Предположим простейший случай: действуют условия "а" и "г". В этом случае ГЖС движется от башмака до устья, и расчет ведется по соответствующим формулам для газожидкостной смеси по шагам, начиная от башмака НКТ от точки с давлением P_c и до устья. Давление на устье получаем путем суммирования элементарных перепадов давления на n шагах:

$$P_y = P_c - \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (10)$$

Если действуют условия "а" и "в", т.е. выделение газа начинается выше забоя в НКТ, то до точки $P_{нас}$ расчет ведется по обычным формулам трубной гидравлики, с помощью которых определяются потери давления на трение.

Обозначим длину участка НКТ от забоя до точки с давлением $P_{нас}$, на котором будет двигаться однородная жидкость, через h (см. рис. 2). Тогда для этого участка запишется очевидное равенство давлений:

$$P_c = P_\Gamma + P_{тр} + P_{нас} \quad (11)$$

Где $P_\Gamma = \rho_{ж} \cdot g \cdot h$ гидростатическое давление столба жидкости высотой h и плотностью $\rho_{ж}$;

$$P_{тр} = \lambda \cdot \frac{h}{d} \cdot \frac{C^2}{2 \cdot g} \cdot \rho_{ж} \cdot g$$

- потери давления на трение при скорости жидкости C , м/с. Подставляя значения P_Γ и $P_{тр}$ в (11) и решая относительно h , получим

$$h = \frac{P_c - P_{нас}}{\rho_{ж} \cdot g * \left(1 + \lambda \cdot \frac{C^2}{2 \cdot g \cdot d} \right)} \quad (12)$$

Обычно второе слагаемое в круглых скобках знаменателя мало, поэтому им часто можно пренебречь.

На остальной длине НКТ, равной $L - h$, т. е. от точки давления насыщения и выше, будет происходить движение ГЖС, поэтому давление на устье будет равно

$$P_y = P_{\text{нас}} - \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (13)$$

Если действует условие "б", т. е. когда башмак НКТ выше забоя на величину $a = H - L$, то на этом участке при расчете распределения давления вместо диаметра трубы подставляется диаметр обсадной колонны.

Поскольку потери давления на трение из-за большого диаметра на этом участке малы, то ими всегда можно пренебречь. Давление на устье P_y определяется либо по формуле (10), либо по (13) в зависимости от того, выделяется ли газ с самого забоя (10) или НКТ (13).

Рассчитав кривую распределения давления и определив давление на устье скважины при заданном режиме ее работы, сопоставим вычисленную величину P_u с возможным давлением в выкидной линии P_l , по которому продукция скважины поступает в систему нефтегазосбора промысла. Если $P_u > P_l$, то работа скважины на рассчитанном режиме возможна, а избыточное давление на устье $\Delta P_{шт} = P_u - P_l$ должно быть понижено созданием в арматуре устья дополнительного гидравлического сопротивления в виде регулируемого или нерегулируемого штуцера, в котором поток ГЖС дросселируется с давления P_u до давления P_l . Если при расчете окажется, что $P_u < P_l$, то фонтанирование скважины на проектируемом режиме будет невозможно. В таком случае необходимо задаться меньшим отбором Q , при котором давление на забое возрастает. Это в свою очередь приведет к более высокому давлению на устье скважины.

Изменяя отбор, а следовательно, и давление на забое, можно подобрать такие соотношения, при которых окажется $P_u > P_l$, когда фонтанирование будет возможно. Если ни одна комбинация Q и соответствующего P_c при построении кривой распределения давления $P(x)$ не дает давление на устье $P_u > P_l$, то фонтанирование такой скважины вообще невозможно.

Изложенная система расчета процесса фонтанирования может быть повторена для труб меньшего или большего диаметра для определения возможных режимов фонтанирования и дебита скважины при других диаметрах фонтанных труб.

Рассмотрим другой, наиболее общий случай, когда возникает необходимость определения всего комплекса возможных и невозможных условий фонтанирования скважины. При этом будем считать, что все проектируемые отборы жидкости из пласта допустимы и не противоречат принципам рациональной разработки залежи.

а. Задаемся несколькими забойными давлениями P_{ci} , лежащими в пределах $P_{min} < P_{ci} < P_{пл}$, где $P_{пл}$ - пластовое давление, а P_{min} - минимальное давление на забое, при котором фонтанирование скважины заведомо неосуществимо.

б. Для принятых значений P_{ci} определяем приток жидкости в скважину Q_i по уравнению притока или по индикаторной линии.

в. Задавшись диаметром НКТ, рассчитываем распределение давления $P(x)$ по методу снизу вверх для принятых значений забойных давлений P_{ci} и соответствующих им дебитов Q_i . В результате получаем i кривых $P(x)$ (рис. 3).

г. По полученным кривым $P(x)$ определяем i значений устьевых давлений P_{yi} .

д. Получаем систему данных, состоящих из нескольких забойных давлений P_{ci} , дебитов скважины Q_i , и устьевых давлений P_{yi} .

Причем каждому конкретному давлению на забое P_{ci} соответствует конкретный дебит и вычисленное давление на устье P_{yi} . Поскольку увеличение давления на забое P_{ci} сопровождается уменьшением притока Q_i и, как правило, увеличением давления на устье P_{yi} , то полученная система данных будет находиться в следующих соотношениях:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{c1} > P_{c2} > P_{c3} > \boxtimes > P_{ci} \\ Q_1 < Q_2 < Q_3 < \boxtimes < Q_i \\ P_{y1} > P_{y2} > P_{y3} > \boxtimes > P_{yi} \end{array} \right. \quad (14)$$

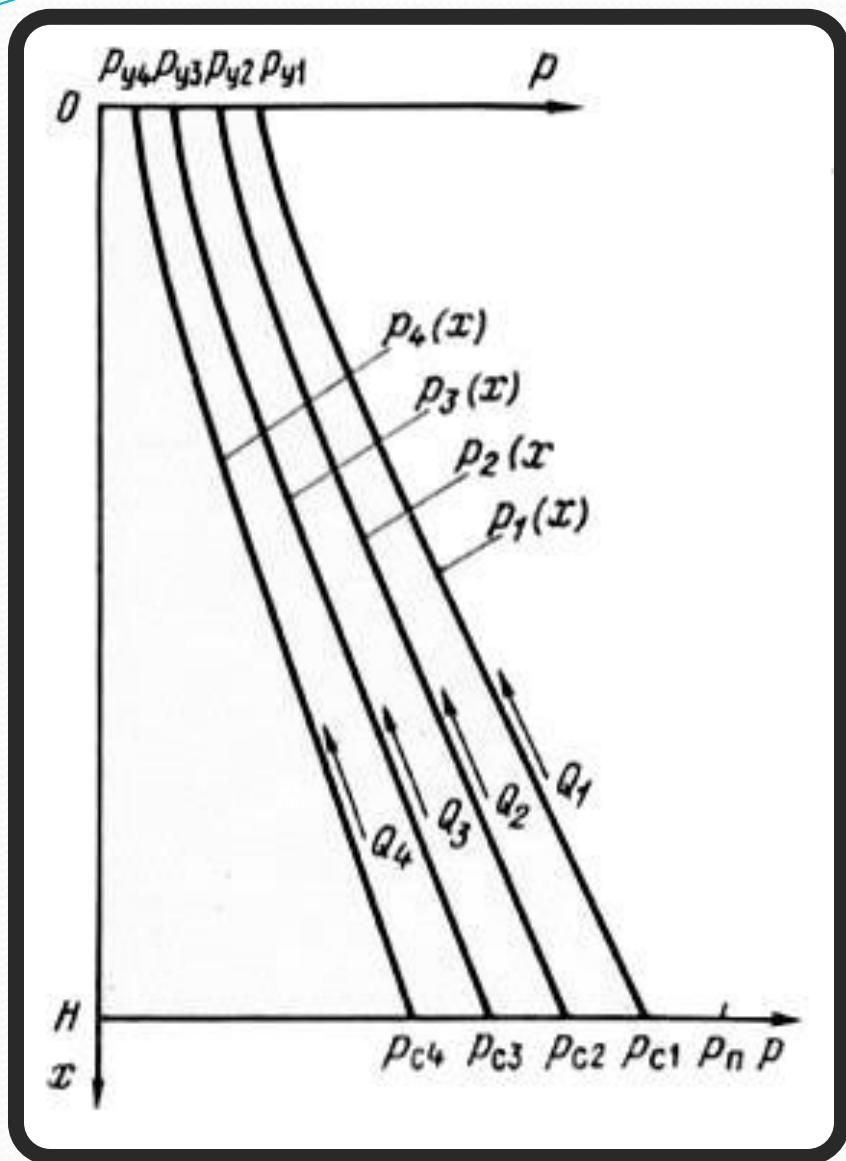


Рис. 3. Кривые распределения давления в фонтанном подъемнике при нескольких (четырех) режимах работы

По полученным данным (14) можно построить две графические зависимости $Q = f_1(P_c)$ и $P_y = f_2(P_c)$ (рис. 4). Графики отражают совместную, согласованную работу пласта и газожидкостного подъемника, общей точкой для которых является давление на забое скважины P_c . Отметим, что понижению давления P_c не всегда должно соответствовать уменьшение давления на устье P_y , как это показано на рис. 4.

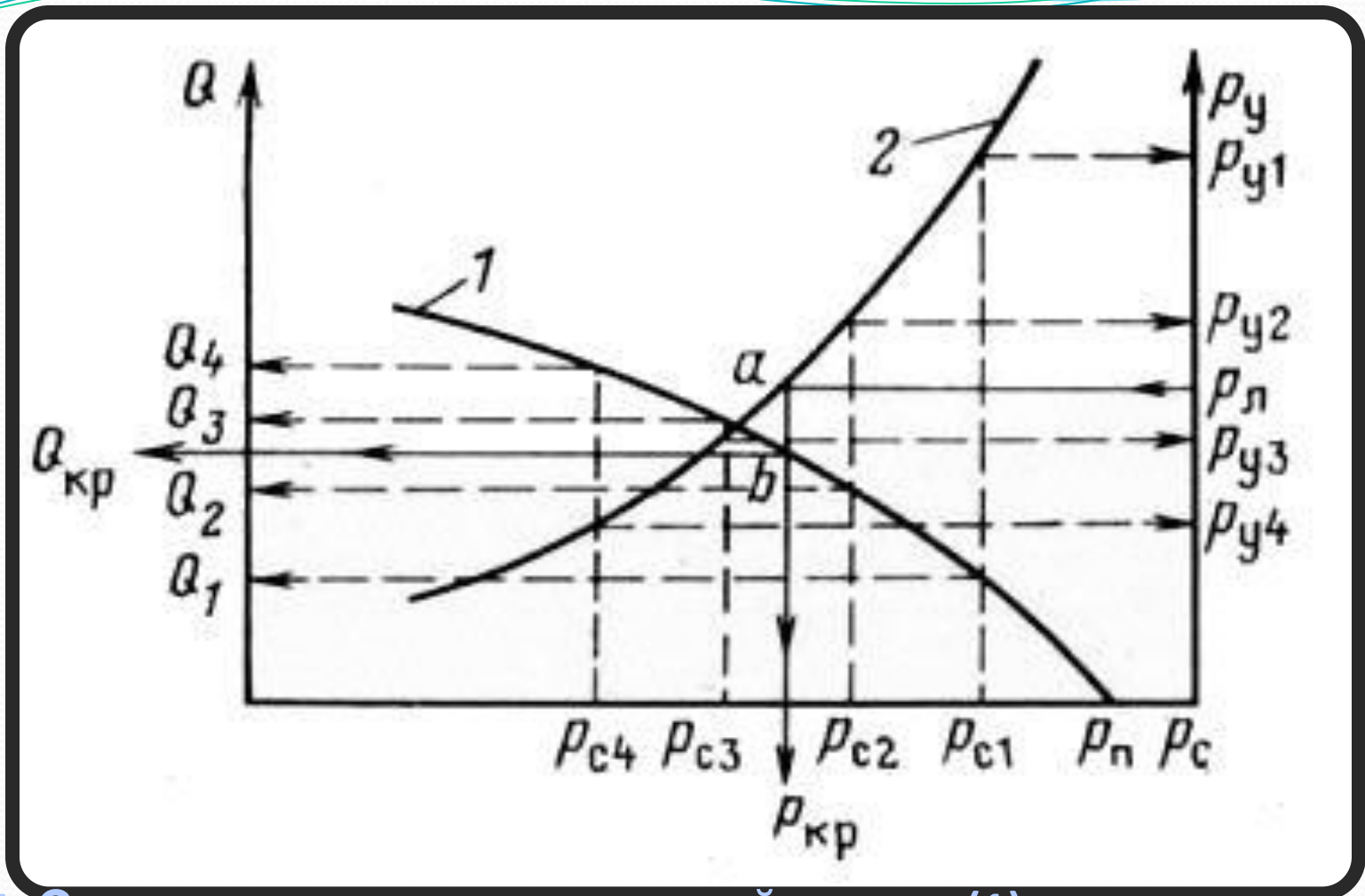


Рис. 4. Согласование индикаторной линии (1) с зависимостью устьевого давления P_y от давления на забое скважины P_c (2). Точки а - б разделяют возможные и невозможные режимы фонтанирования

Изменение P_c , сопровождаемое соответствующим изменением притока Q , приводит к изменению режима работы самого газожидкостного подъемника, который при определенных условиях может совпадать с режимами оптимальной или максимальной подачи или иметь какой-то промежуточный режим. К.п.д. при этих режимах различный. Это может привести к различным зависимостям давления на устье от давления на забое и, в частности, к зависимостям, имеющим максимум или минимум. Это выявляется при расчете кривых $P(x)$.

На оси P_u можно отложить давление в выкидной линии P_l , по которой продукция скважины поступает в систему промышленного нефтегазосбора. Эта величина отсечет на графике (см. рис. 4) возможные режимы фонтанирования для условий данной скважины.

Точка а соответствует минимально допустимому давлению на устье ($P_y = P_l$), а ее проекция на ось абсцисс определит соответствующее этому режиму работы критическое забойное давление $P_{кр}$. Пересечение вертикали с кривой $Q(p_c)$ (точка б) дает критический дебит скважины $Q_{кр}$, превышение которого приведет к давлению $P_y < P_l$. Таким образом, область режимов фонтанирования скважины, лежащая влево от вертикали, проходящей через точки а и б, нереальная, а область режимов, лежащая вправо от той же вертикали, осуществима, так как при условиях $P_c; Q; P_y$ пластовая энергия превышает необходимую для подъема жидкости. Избыток энергии обуславливает устьевое давление P_y , превышающее давление в выкидной линии P_l . Для поглощения этой энергии применяется штуцер, в котором создается перепад

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

