

МЕХАНИКА ИЗВЕРЖЕНИЙ

Дрозни В.А.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, dva.@kscnet.ru

О названии

Слово «извержение» ассоциируется с вулканом, а на Камчатке и с гейзером.

Механика это учение о равновесии и движении тел при познании природы. При извержении вулкана выносятся вещество недр в виде газа, лавы, бомб, пепла - поэтому процесс движения можно характеризовать как дисперсное течение. При гейзере в воздух выносятся вода и пар - движение определяется как газо-жидкостное течение.

Газлифт

При обучении вёл курс Лойцянский Л.Г. «Механика жидкости и газа». Этот курс об однофазном течении: газа или жидкости. Совместное течение потребовалось в геотермии при эксплуатации пароводяных скважины. Наука о совместном течении возникла при добыче нефти. Газлифт - впервые подъём нефти сжатым газом в России был осуществлён великим русским инженером В. Г. Шуховым в 1897 г. В советское время большой вклад в развитие газлифтного способа эксплуатации нефтяных скважин внёс академик А. П. Крылов. С основной закономерностью газлифта: **нелинейная зависимость расхода от перепада давления** - я познакомился в публикации Архангельский В.А., 1958г [3]. О продукции в геотермальных скважинах как о **парлифте** пишут Аверьев В.В., Сугробов В.М. в «Паужетские горячие воды на Камчатке. 1965» [1].

Ниже с газлифтом знакомлю по публикации учебного пособия: Арбузов В.Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин, 2011, 2012г [2].

Газлифт рассматривается как подъём смеси жидкости с газом (синоним - эрлифт: по английскому airlift: от air — воздух и lift — поднимать).

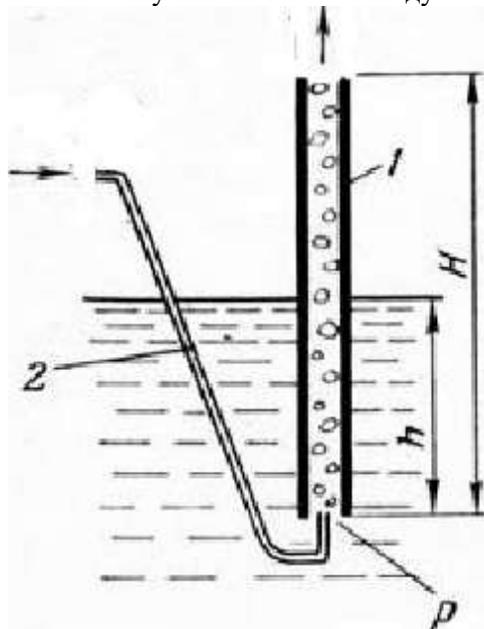


Рис. 1 Принципиальная схема эксперимента газлифта

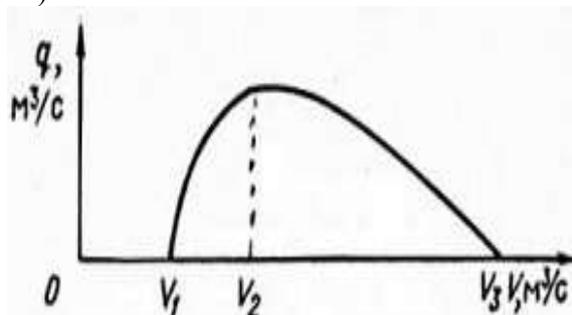


Рис. 2

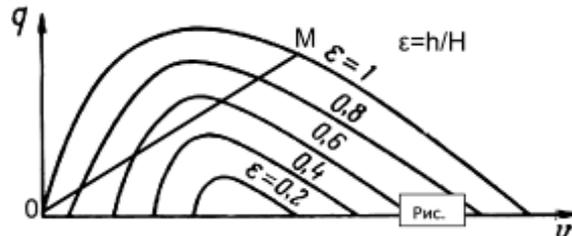


Рис. 3 Серию кривых (Рис. 3) расхода жидкости от расхода газа

На рис.1 приведена принципиальная схема эксперимента газлифта. Труба 1 погружена под уровень на глубину h жидкость. К нижнему концу трубки подведен патрубок 2 для подачи газа. Давление составляет гидростатическое $P=\rho gh$ на глубине h и, очевидно, оно постоянно и не зависит от количества газа, подаваемого в трубу. При очень малом расходе газа, газ побулькивает сквозь воду. При расходе $V=V_1$ уровень H достигнет верха трубы (Рис.2). При большем расходе газ-воздушная смесь переливает через верхний конец трубы. При дальнейшем увеличении расхода газа, увеличивается и расход жидкости. При большом расходе газа по трубе будет идти только газ $>V_3$, расход жидкости практически будет равен нулю. При некотором расходе газа $V=V_2$ дебит жидкости имеет максимум $q=q_{\max}$. Изменяя положение трубы, характеризуя её параметром $\epsilon=h/H$ соотношение к длине трубы к части её в глубине, в результате получим серию кривых (Рис. 3) расхода жидкости от расхода газа.

Проведя прямую OM на рис.3, соответствующую постоянному отношению расхода газа к расходу жидкости, и, вынеся точки пересечения, получим график на Рис.4

Эта зависимость демонстрирует главные особенности газожидкостного потока в вертикальном канале. Она получена логически. Экспериментальную подобную зависимость Рис.4б впервые я увидел у Архангельского В.А.

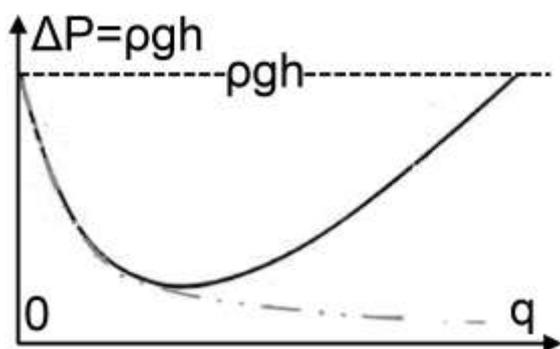


Рис.4: зависимость перепада давления на длине трубы от расхода жидкости. (Штрих-пунктирная линия – давление нивелирующей составляющей).

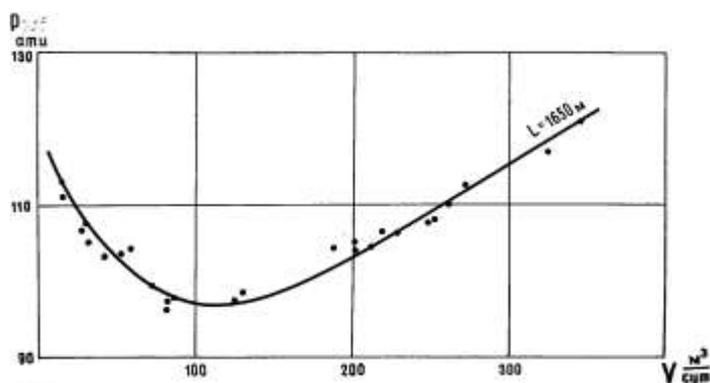


Рис. 4б. Зависимость давления на глубине 1650 м от расхода для фонтанирующей нефтяной скважины при буферном давлении 5 атм, диаметр скважины 2.5"

Свойства газлифта:

1. С ростом расхода перепад давления падает, достигает минимума, а затем увеличивается. Эта зависимость отличается от однофазного потока, где увеличение расхода соответствует увеличению перепада давления.

2. Одно значение перепада давления может соответствовать двум разным значениям расхода.

3. Градиент давления течения в канале газ-жидкостной смеси меньше плотности жидкости (давление меньше гидростатического).

4. Процесс газлифта происходит с к.п.д: отношением полезной работы (подъёма жидкости от высоты h до высоты H) к затраченной работе газа (порядка изотермического процесса расширения газа от давления $\Delta P=\rho gh$ до давления на выходе). Эффект газлифта с к.п.д. > 0 существует всегда, если наблюдается течение (движение в поле тяжести) смеси газа и жидкости. (по Арбузову В.Н. полагается, что к.п.д. не более 30%)

Примечание. Свойства газлифта не зависят от протяжности канала, то есть свойства имеются и в любой части канала, и для всего канала.

Режимы газо-жидкостного течения

В коротких каналах о газлифте, как процессе, можно говорить о конечной протяженности формы течения. Газо-жидкостные течения характеризуются разными режимами - формами: от пузырькового, снарядного, диспергированного (расслоенного) к дисперсному по Козлову Б.К. 1955г.[8]. В длинном вертикальном канале с высотой формы течения сменяются из-за уменьшения давления. Подобную их смену можно показать как на иллюстрации Рис.5 испарительной трубке парогенератора.

Формы течения можно представить, но снарядную придумать трудно, её надо было увидеть.

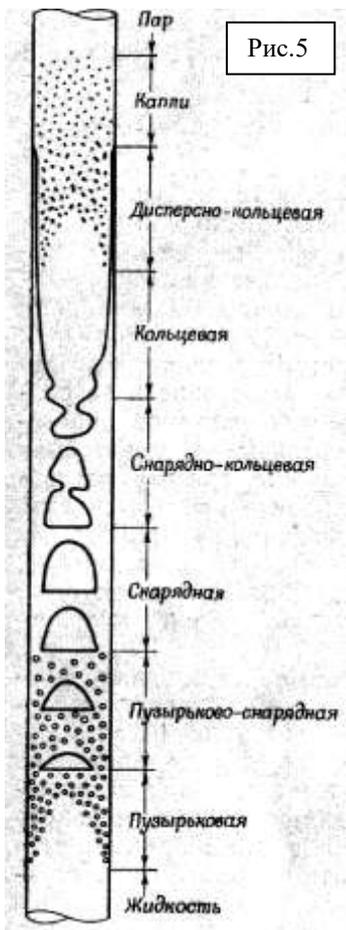


Рис.5

Заметим, что скорость газа всегда больше, чем скорости жидкости и мы говорим о всплывании пузырей газа (до снарядного режима) и о падении капель.

Протяженность снарядов имеет несколько калибров, поэтому о свойствах процесса газлифта можно говорить о каналах больше чем протяженность формы течения.

Заметим, что Озеровым А.Ю., 2016 [9] на сконструированной и изготовленной экспериментальной установке моделирования движения двухфазных смесей в протяженных вертикальных колоннах (КАМБИ) описаны более детальные формы и важно (для стромболианских извержений) описаны кластерные режимы течения.

Гидродинамика пароводяной скважины

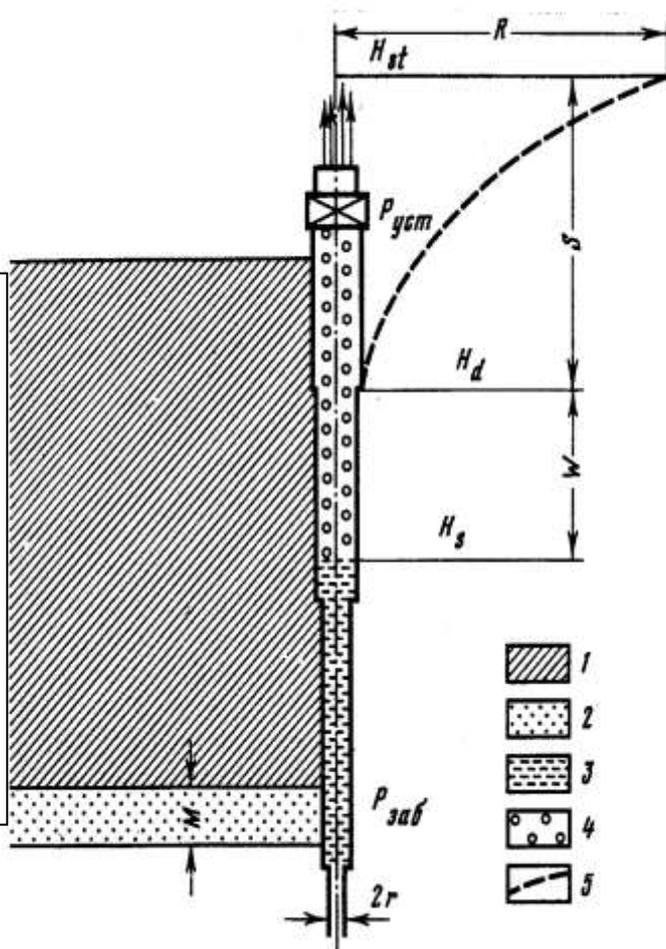
Гидродинамику скважины для газированных нефтей Архангельский В.А. [3] предлагает рассматривать как систему двух элементов: **пласт** и собственно **скважины**. Для исследования динамики им вводятся характеристики пласта и скважины. При этом рассматриваются два графика для установившихся течений зависимости расхода от забойного давления. (расходное газосодержание принимается постоянным по высоте у Архангельского В.А.). Характеристика пласта – зависимость расхода от забойного давления, описывается как, например, в (Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика) или, в частности, как известное выражение Дюпюи о **пропорциональности расхода от разности давлений** пластового и забойного.

График рис.4 можно рассматривать

как характеристику скважины: график расхода из-за перепада давления от забоя давления до выхода.

В принципиальной схеме Аверьева В.В. на Рис.6 совмещены параметры

Рис.6. Гидродинамическая система действующей пароводяной скважины (По В.В. Аверьеву. Паужетские горячие воды..., 1965): 1 - водонепроницаемые породы; 2 - водоносный горизонт с температурой выше 100°C; 3 - вода; 4 - пароводяная смесь; 5 - кривая депрессии; M - мощность водоносного горизонта; $H_{ст}$ - статический уровень термальных вод; H_d - динамический уровень; H_s - уровень парообразования; S - понижение динамического уровня; h_w - высота столба воды, оказывающего давление, равное давлению насыщенного пара при имеющейся температуре; R - радиус воронки депрессии; r - радиус скважины; $P_{уст}$ - давление под устьевой задвижкой; $P_{заб}$ - давление вод на забое скважины.



артезианской и пароводяной скважины.

Положение параметра - уровень начала парообразования, где давление (насыщения) соответствует температуре насыщения. Выше двухфазный поток, ниже - жидкостный. Очевидно, забойное давление равно сумме гидростатического давления столба жидкости от уровня начала парообразования до забоя, к

давлению насыщения. Характеристика скважины по забойному давлению эквидистанта характеристики по уровню начала парообразования. Эта характеристика и используется для пароводяных скважин как зависимость глубины начала парообразования от расхода при разнице давления насыщения и устьевого для теплосодержания термальной воды.

Расчёт уровня начала парообразования

Перепад давления при гидравлическом подходе при течении в каналах рассчитывают три составляющие: нивелирующая, трения, ускорения. В однофазном потоке нивелирующая составляющая равна гидростатической. В газожидкостном потоке удельный вес теряет смысл для смеси как лабораторный удельный вес для гидростатического давления. В газожидкостном потоке составляющая нивелирующая должна была иметь зависимость от расхода: уменьшение с увеличением расходом (которое показано штрихпунктирной линией на рис.4). Автор нашел нужную эмпирическая зависимость у Зубер и Финдлен [7]. Это позволило автору защитить диссертацию по расчёту характеристики скважины: зависимость глубины начала парообразования (Приложение 1). Для понимания процесса:

1 охарактеризовано оптимальное значение расхода, где перепад давлений минимальный.

2 имеется максимальный уровень начала парообразования и оно зависит только от теплосодержания воды.

О нестационарных процессах фонтанировании скважин

На Рис. 7 показана характеристики скважины, открытой на атмосферу, и возможные варианты расположения характеристики пласта. Линии 1,2, когда пьезометр больше поверхности; линии 3 и 4 – пьезометр ниже. Рабочая точка (пересечение характеристик) имеется по одной на линиях 1,2 и по две на линиях 3,4. Ентов В.М. [6] показал, что только точки на линии 4 (расположенные на падающей характеристике и при расходах меньше оптимального) не устойчивы, остальные устойчивы.

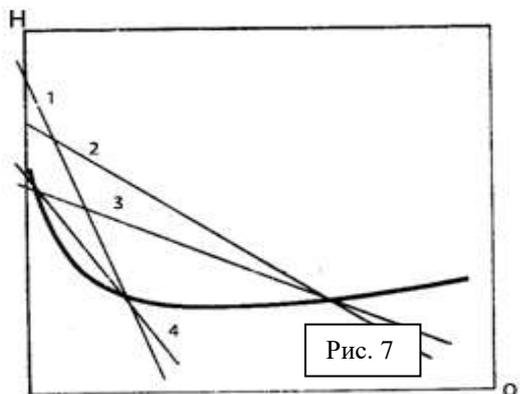
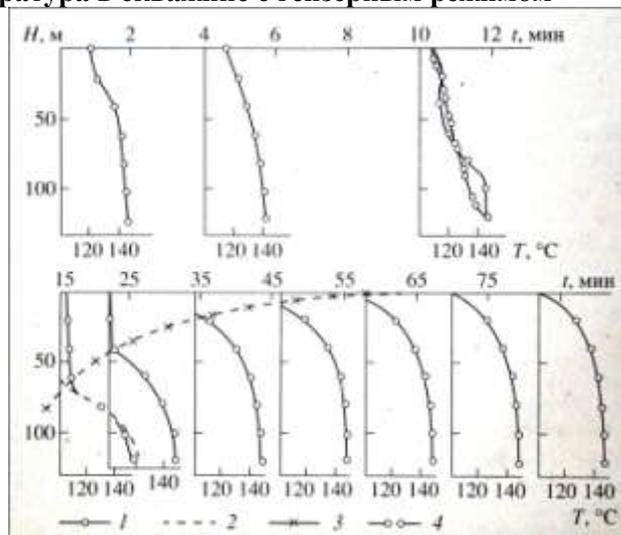


Рис. 8. Температура в скважине Р-1 с момента начала извержения : 1- в стволе; 2- линия насыщения воды над максимумом уровня начала парообразования; 3- уровень воды в стволе; 4- расчётное распределение температур при оптимальном расходе. (Паужеское геотермальное месторождение.)

Изменение температур в скважине описываем в двух рядах (рис. 8): верхний ряд термограмм соответствуют собственно извержению, а нижний ряд – заполнению. При извержении на устье давление увеличится, становится больше атмосферного. Извержение начинается с образованием газовой фазы где-то под оголовком. Уровень начала парообразования сверху уходит в глубину, через 16 мин он достигает максимум 120м. При этом давление на этом уровне постоянно всё время извержения. Течение смеси спутно, но фазы идут с разной скоростью, спутное течение заканчивается, когда возможен процесс сепарации, т.е. когда максимальный уровень достигнут. Вода осаждается. Давление на этом уровне резко падает. Распределение температуры в стволе на максимальном уровне соответствует линии насыщения. Затем давление на максимальной глубине начинается увеличиться так как, граница между водой и паром $\approx 100^{\circ}\text{C}$ поднимается к поверхности (к 65 мин). Температура выполаживается из-за теплообмена с вмещающей средой.

Температура в скважине с гейзерным режимом



О гейзерах

Гейзер это пароводяной источник, который, в отличие от пульсирующего, имеет фазу покоя. Модели гейзера были известны более 200 лет. В Институте вулканологии в каб. 216 во время IV Всесоюзного вулканологического совещания демонстрировались три основные лабораторные модели гейзеров: камерная, смешения, скважинная. Модели демонстрируют регулярные гейзеры. Парообразование в скважинной модели происходит в протяженной части канала, в камерной модели в не проточной полости, в модели смешения парообразование гасится холодной водой. Любой гейзер имеет уникальную динамику из-за разнообразия форм геометрии систем каналов и источников питания как, например Lloyd E.F. так поясняет механизм новозеландских гейзеров: **Pohutu, Prince of Wales Feathers, Waikorohihi, Te Horu**

Извержение гейзера – это течение двухфазной смеси, основная фаза гейзера. В быту мы потоки обычно связываем с перепадом давлений или напором, а здесь течение происходит самопроизвольно и никто, и ничто таких избыточных давлений не находит и не создаёт.

О вулканах

Механика вулканического извержения, процесс газлифт. Колонна насыщенной магмы находится при литостатическом давлении. При начале движения нивелирующая составляющая должна уменьшаться. Течение газосодержащей смеси образуется самопроизвольно, распределение общего давления контролируется литостатическим (не больше его). Смесь чаще расширяется сверху вниз. Извержение кончается, когда спутное течение не может поддерживаться, то есть преобразуется на сепарационное осаждение. Начинает расти столб осажденной фазы.

На вулкане обращается внимание на запуск извержения, т.е на момент формирования спутного течения. Обсуждают триггеры, декомпрессию и т.п. Выделю процесс сепарации, когда газ опережает колонну магмы и провоцирует локальные центры начала. Сепарация на верху присуща в ходе извержения при разделении на лаву, пирокластику и парогазовую. В канале ниже течение становится спутным (без сепарации), с уровня которого работают расчётные модели [5].

Человек первые механизмы создал для подъема груза. Не сразу, позже создали насосы, но которые до сих пор требуют избыточного давления. **Природа демонстрирует подъём, когда газонасыщенная жидкость поднимает и камни выше дневной поверхности и без избыточного давления и формирует гигантские вулканы, правда циклически.**

Список литературы

1. Аверьев В.В., Сугробов В.М. в «Паужетские горячие воды на Камчатке. 1965»
2. Арбузов В.Н. Эксплуатация нефтяных и газовых скважин: учебное пособие. Часть 1,2. Изд-во Томского политехнического университета, 2011, 2012
3. Архангельский В.А., Движение газированных нефтей в системе скважина-пласт. М., Изд. Во АН СССР, 1958, 92с.
4. Дрознин В.А., Разина А.А. О природе гейзерного режима. //В кн. «Гидротермальный процесс в областях тектоно-магматической активности», М.,Наука,1971, с. 96-103
5. Дрознин В.А., Дрознина С.Я. Пространственно временное распределение землетрясений при трещинном Толбачинском извержении им. 50-летия ИВиС.// Материалы региональной конференции, «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29 - 30 марта 2013 ,П.К, сс 185-193
6. Ентов В.М. О нестационарных процессах при фонтанировании скважин. //Изв. АН СССР. Сер.мех. и машиностроения, 1964, №2, 31-40
7. Зубер и Финдлен Средняя объёмная концентрация фаз в системах с двухфазным потоком.// Теплопередача, 1965, №4, с 29-47
8. Козлов Б.К. Режимы и формы движения воздушно-водяной смеси в вертикальной трубе. //В кн. Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления. 1955, с 7-18.
9. Озеров А.Ю. Динамика извержений и петрохимические особенности глиноземистых базальтов Ключевского вулкана. Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Москва. 2016. 428 с.