

На первом этапе разведки на Паужетском месторождении применялась поинтервальная система опробования водоносного комплекса с останковкой процесса бурения. Она была выдержана на 800-метровой роторной скважине и на первой колонковой скважине. Благодаря этому, удалось составить принципиальную гидрогеологическую характеристику отдельных литологических комплексов, слагающих месторождение, и выявить продуктивную толщу псефитовых туфов среднепаужетской подсвиты. впоследствии, когда скважины разбуривали, в основном только эту толщу, поинтервальная система сменилась опробованием всего вскрытого и необсаженного трубами водоносного комплекса.

Опробование проводилось после окончания бурения. Это значительно облегчало проходку скважин, но создавало ряд затруднений при расшифровке мест водопритоков. В связи с этим, данные по фильтрационным свойствам пород и их обводненности по ряду скважин являются усредненными. Однако участки сильных водопритоков выявлялись достаточно уверенно. Это можно было сделать благодаря сопоставлению данных опробования с наблюдениями в процессе бурения за поглощением раствора и буримостью пород.

Опробование пароводяных скважин сопряжено со значительными трудностями, так как общепринятые методика и конкретные приемы гидрогеологических испытаний оказываются здесь часто неприемлемыми.

До начала разведочных работ на Паужетке отечественная гидрогеология не сталкивалась с подобного рода объектами.

В имевшихся зарубежных материалах, в основном в новозеландских работах (L. J. Grange, 1955), имелось довольно подробное описание техники измерений производительности пароводяных скважин. Краткая характеристика этих приемов дается в небольшой статье В. В. Иванова и Б. И. Пийпа (1960), посетивших Новую Зеландию в 1959 г. Однако разбор общих методических положений в упомянутых работах отсутствует. Это легко объяснимо. Опробование пароводяных скважин — новый раздел в практике гидрогеологических работ, и многие теоретические стороны вопроса в настоящее время слабо разработаны.

На Паужетке была разработана методика испытаний пароводяных скважин, базирующихся на гидрогеологической основе. В отношении технической стороны дела она имеет много общего с зарубежной, в частности новозеландской, практикой.

### ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Специфика опробования пароводяных скважин обусловлена тем, что на месторождениях, подобных Паужетскому, бурением вскрываются напорные воды с температурой значительно выше 100° С. До тех пор, пока на глубине вода находится под давлением, превышающим давление насыщенного пара при данной температуре, она не вскипает. Однако во время действия скважины вода в конце концов поднимается до такого уровня, где возможно ее вскипание, и в стволе скважины образуется пароводяная смесь. При приближении к устью скважины количество пара прогрес-

сивно нарастает; соответственно с этим возрастает скорость пароводяной смеси, достигая на выходе в ряде случаев сотен метров в секунду.

Своеобразная гидродинамика пароводяных скважин в основном и предопределяет как программу их испытаний, так и методы опробования. Ниже будут рассмотрены главные характерные особенности таких скважин.

Процесс истечения пароводяной смеси из скважины в первом приближении, необходимом для практических расчетов, можно рассматривать как адиабатический. Действительно, вынос тепла из скважин, заключенного в пароводяной смеси, измеряется обычно тысячами *ккал/сек*. На этом фоне тепловые потери в окружающее пространство, не превышающее, как показывают расчеты, 1—10 *ккал/сек*, не имеют существенного значения.

Количество пара в пароводяной смеси, измеряемое обычно в весовых процентах, строго контролируется величиной энтальпии и давлением в данной точке. Оно может быть легко рассчитано по соответствующим теплотехническим формулам, которые приводятся в следующих разделах, если известны указанные параметры. Величина паросодержания в свою очередь дает возможность рассчитать удельный вес пароводяной смеси, удельный объем, а следовательно — и скорость ее движения, если известен расход.

Основные формулы для расчетов параметров пароводяной смеси (при известном давлении):

$$i_{\text{пвс}} = i' (1 - x) + i'' x, \quad (1)$$

$$\gamma_{\text{пвс}} = \frac{1}{\frac{1-x}{\gamma'} + \frac{x}{\gamma''}}, \quad (2)$$

$$V_{\text{пвс}} = \frac{1}{\gamma_{\text{пвс}}} = \frac{1-x}{\gamma'} + \frac{x}{\gamma''} = (1-x)V' + xV'', \quad (3)$$

$$W_{\text{пвс}} = \frac{Q \cdot V_{\text{пвс}}}{S}, \quad (4)$$

где  $i$  — энтальпия (в *ккал/кг*) пароводяной смеси ( $i_{\text{пвс}}$ ), воды ( $i'$ ) и пара ( $i''$ );  $x$  — паросодержание в 1 *кг* пароводяной смеси (в долях *кг*);  $\gamma$  — удельные веса пароводяной смеси ( $\gamma_{\text{пвс}}$ ), воды ( $\gamma'$ ) и пара ( $\gamma''$ ) в *кг/м<sup>3</sup>*;  $V$  — удельные объемы пароводяной смеси ( $V_{\text{пвс}}$ ), воды ( $V'$ ) и пара ( $V''$ ) в *м<sup>3</sup>/кг*;  $W$  — скорость пароводяной смеси в *м/сек*;  $Q$  — расход пароводяной смеси в *кг/сек*;  $S$  — сечение труб в *м<sup>2</sup>*.

Значения  $i'$ ,  $i''$ ,  $V'$ ,  $V''$ ,  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  берутся из таблиц сухого насыщенного пара.

Температура и давление взаимно определяют друг друга, и каждому значению давления соответствует строго определенная температура и наоборот, что позволяет отказаться при опробовании пароводяных скважин от одновременных замеров температур и давлений и измерять только какой-либо один параметр, находя другой по теплотехническим таблицам. Это подтверждено результатами контрольных измерений давления и температур в условиях резко меняющегося режима.

Во время действия скважины на ее устье устанавливается то или иное давление насыщенного пара, которое определяется, с одной стороны — тепловыми параметрами и расходом пароводяной смеси и, с другой, — условиями выхода смеси в атмосферу. Это давление легко регулируется прикрытием и открытием задвижки.

Минимальное давление на устье, практически равное атмосферному, достигается при свободном вертикальном фонтанировании скважины без установки каких-либо дополнительных устройств. При монтаже

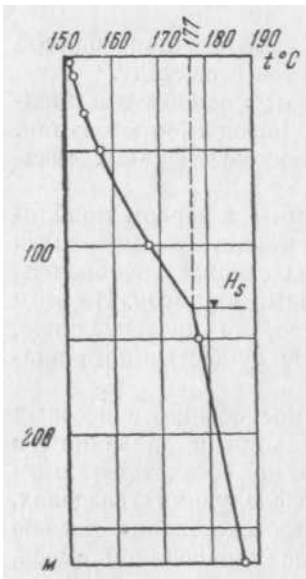


Рис. 39. Температура в действующей скв. 2. Давление на устье 3, 4 *ти*, средняя энтальпия 77 ккал/кг,  $H_s$  — уровень парообразования

различных отводов, в том числе измерительных, нижний предел давления повышается и особенно значительно — с уменьшением диаметра отвода.

Максимальное значение давления ограничивается величиной, соответствующей температуре термальной воды, вскрытой скважиной. Однако рабочие давления на устье пароводяных скважин всегда значительно ниже этой величины. Так например, максимальной температуре 195°, зафиксированной на Паужетском месторождении в скв. 14, соответствует давление насыщенного пара 14,2 *ата*. Максимальное же рабочее давление на устье этой скважины составляет всего 6,75 *ата*. Эта отставание рабочих давлений от максимально возможных объясняется тем, что уровень парообразования в скважине находится на большой глубине и во время подъема пароводяной смеси часть внутренней энергии пара переходит в кинетическую энергию, которая расходуется на перенос воды, а также тратится на преодоление гидравлических сопротивлений.

Глубина образования паровой фазы находится в сложной функциональной зависимости от температуры вскрытой воды, ее расхода и условий движения по стволу скважины и отводам на поверхности. В общем случае глубина парообразования

тем больше, чем выше температура вскрытой воды и чем шире ствол скважины; с ростом гидравлических сопротивлений на пути движения смеси она уменьшается. По данным опытных работ парообразование в действующих скважинах начинается на глубине десятков и сотен метров.

На Паужетском месторождении определение глубины парообразования производилось с помощью измерения температур в стволе действующей скважины. Так как парообразование в скважине сопровождается уменьшением температуры вскипевшей воды, на всем интервале от уровня парообразования до устья скважины температуры имеют более низкие значения, чем это следует из величины теплосодержания пароводяной смеси, замеренной на поверхности. На графике температуры (рис. 39) выделяются два участка, один из которых криволинейный — характеризует рост температур в зоне пароводяной смеси, а второй — более крутой и прямолинейный — температуру воды на глубине. В месте сопряжения этих участков фиксируется температура, равная среднему значению теплосодержания пароводяной смеси и соответствующая ей глубина парообразования. В принципе уровень парообразования можно определить также по изменению давлений в действующей скважине с помощью глубинного манометра.

Найденной глубине парообразования всегда соответствует строго определенное давление, а именно — давление насыщенного пара при имеющейся температуре. Благодаря этому обстоятельству, можно произвести оценку гидродинамического состояния скважины. Действительно, если на некоторой глубине существует давление, которое по своей величине значительно меньше пластового давления на этом же уровне, то происходит отсачка воды, обусловленная глубоко проникающим парообразованием, т. е. эффект парлифта. При этом каждому положению уровня парообразования соответствует определенный перепад давлений и определенный расход.

Следствием парлифта является высокая производительность скважин, измеряемая часто десятками килограммов в секунду. Особенно резко влия-

ние парлифта на производительность скважин сказывается на месторождениях, где водоносные породы обладают относительно низкими фильтрационными свойствами. В самом деле, когда парообразование происходит на глубине сотен метров, перепад между давлением в пласте и в стволе скважины достигает десятков атмосфер. Поэтому, несмотря на невысокие фильтрационные свойства пород, поступление воды в ствол скважины идет очень интенсивно.

Глубина парообразования в гидродинамическом отношении имеет нечто общее с понижением динамического уровня при откачке обычных артезианских скважин. Однако между ними имеется существенная количественная разница. Уровень воды в скважине при обычной откачке (например, штанговым насосом) находится только под атмосферным давлением. В пароводяных скважинах вода на уровне парообразования испытывает давление, равное давлению насыщенного пара при имеющейся температуре, т. е. значительно больше атмосферного. Очевидно, что величина понижения динамического уровня, применяющаяся в гидрогеологических расчетах, меньше глубины парообразования на высоту водяного столба, оказывающего давление, равное избыточному давлению насыщенного пара (рис. 40).

Поскольку давление на уровне парообразования есть величина строго определенная, для ориентировочных гидрогеологических расчетов на пароводяных скважинах с установившимся режимом применимы общие формулы подъемной гидравлики, в частности — формула Дююи:

$$Q = \frac{2\pi MK \Delta P}{\ln \frac{R}{r}},$$

где  $Q$  — дебит скважин;  $M$  — мощность водоносного горизонта;  $K$  — коэффициент фильтрации;  $\Delta P$  — перепад между пластовым давлением и давлением в стволе скважины на уровне парообразования, выраженный в метрах водяного столба;  $R$  и  $r$  — радиусы воронки депрессии и скважины.

На основании изложенного выше, можно сделать вывод, что при получении необходимых данных имеется принципиальная возможность свести методику опробования пароводяных скважин к общепринятой

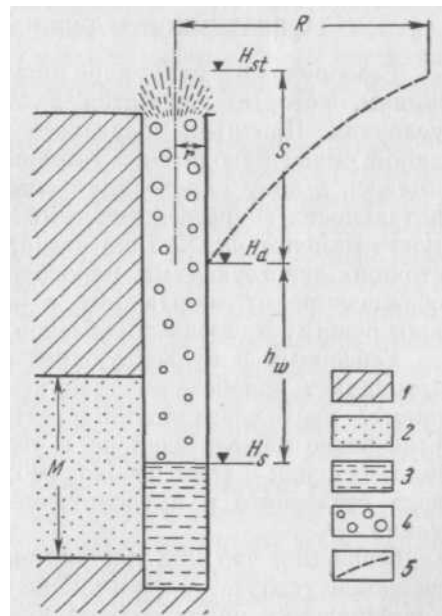


Рис. 40. Гидродинамическая система действующей пароводяной скважины

1 — водонепроницаемые породы; 2 — водоносный горизонт с температурой выше 100° С; 3 — вода; 4 — пароводяная смесь; 5 — кривая депрессии;  $M$  — мощность водоносного горизонта.  $Hst$  — статический уровень термальных вод;  $Hd$  — динамический уровень;  $Hs$  — уровень парообразования;  $hw$  — высота столба воды, оказывающего давление, равное избыточному давлению насыщенного пара при имеющейся температуре;  $R$  — радиус воронки депрессии;  $r$  — радиус скважины

методике гидрогеологических испытаний, и рассматривать расход пароводяной смеси как функцию понижения уровня при откачке. Однако в ряде случаев этому мешают технические трудности. Не всегда бывает возможно точно определить уровень парообразования, особенно если он находится в призабойной части скважины. На практике оказалось более рациональным представлять расход пароводяной смеси как функцию давления пара на устье скважины, которое легко и достаточно точно поддается регулировке с помощью задвижек. При этом более высокому давлению пара на устье соответствует меньшая глубина парообразования и, следовательно, меньшее понижение динамического уровня и меньший расход. Зависимость между расходом и давлением в данном случае имеет обратный характер. Наибольший расход пароводяной смеси наблюдается при свободном фонтанировании скважины, т. е. при минимальном давлении пара на устье, равном 1 *ата*.

Подобно тому, как выражение дебита обычных артезианских скважин лишено почти всякого смысла, если оно не отнесено к какому-то понижению динамического уровня, значения производительности пароводяных скважин имеют смысл лишь тогда, когда они отнесены к какому-то давлению пара на устье. И если при опробовании обычных артезианских скважин составляется график зависимости расхода от понижения уровня (минимум при трех понижениях), на пароводяных скважинах составляется график зависимости расхода от давления пара на устье:  $Q = f(P)$  (минимум при трех значениях давления). Этот график (рис. 56) с нанесенной на него числовой величиной теплосодержания является основной характеристикой пароводяных скважин в части их производительности. Подобная система опробования широко применяется за границей (L. J. Grange, 1955), она была принята также и на Паужетском месторождении.

График  $Q - f(P)$  очень удобен в практическом отношении, так как он непосредственно отражает изменения в расходе пароводяной смеси при вводе на устье скважины тех или иных гидравлических сопротивлений. Это самым тесным образом связано с различными вопросами эксплуатации — с выбором типа турбин, пароотделителей, подводящих трасс и т. д.

## ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМА ПАРОВОДЯНЫХ СКВАЖИН

Разобранные выше гидродинамические положения применимы к скважинам, которые находятся в стабилизировавшихся гидрогеологических условиях. При этом полагалось также, что процесс извержения пароводяной смеси находится в гармоничном сочетании с притоком воды, т. е. имелась в виду пароводяная скважина с постоянным режимом. В действительности гидрогеологические условия на участке заложения скважин могут изменяться. Что же касается режима извержения, то наряду с постоянно действующими пароводяными скважинами имеются скважины, обладающие пульсирующим, а иногда прерывистым режимом, аналогичным режиму природных гейзеров (рис. 41).

Гейзерный и пульсирующий режим во всех отношениях чрезвычайно затрудняет опробование, так как по ходу извержения непрерывно меняются расход, энтальпия и химические показатели пароводяной смеси. Еще более нежелателен он в условиях эксплуатации пароводяных скважин. В связи с этим необходимо коротко остановиться на способах перевода гейзерного и пульсирующего режима в режим постоянного истечения.

Очевидно, что при постоянном режиме должно выдерживаться определенное условие, а именно: поступление воды в ствол скважины из водовмещающих пород должно уравниваться истечением пароводяной

смеси. Если приток воды не компенсирует выброс пароводяной смеси, то для устранения этого явления есть два пути. Один — увеличение устьевого давления и второй — создание дополнительных сопротивлений по пути движения пароводяной смеси, т. е. уменьшение диаметра эксплуатационной колонны.

Наиболее просто режим извержения регулируется с помощью задвижки, т. е. путем увеличения давления на устье скважины. В частности, на скв. 2 пульсирующий режим сменился постоянным после того, как задвижка была прикрыта примерно на  $1/4$  сечения и давление на устье достигло  $4,1 \text{ ата}$ , против  $2,65 \text{ ата}$  при полном открытии задвижки. Этот способ применяется при опробовании довольно часто, но его отрицательным свойством является то, что выравнивание режима извержения достигается ценой сильного уменьшения расхода пароводяной смеси. Так, приведение скв. 1 к постоянному режиму повлекло уменьшение расхода в 7 раз — до  $1 \text{ кг/сек}$  против  $7 \text{ кг/сек}$ . Поэтому более рациональным способом, особенно в условиях эксплуатации, является оборудование скважины колонной труб такого диаметра, который бы максимально точно соответствовал конкретным гидрогеологическим условиям.

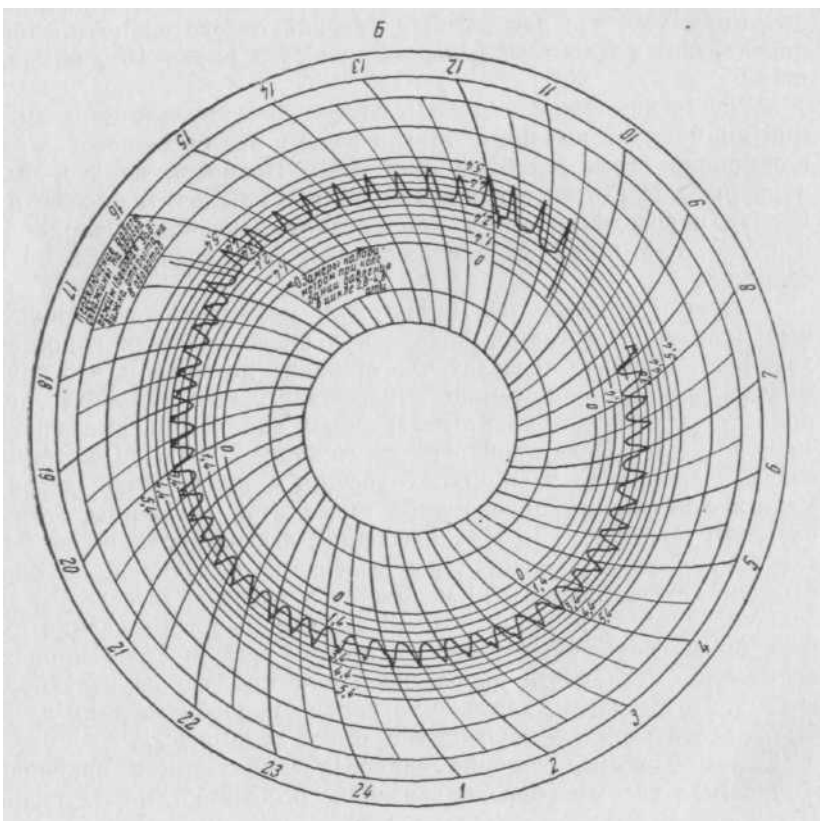
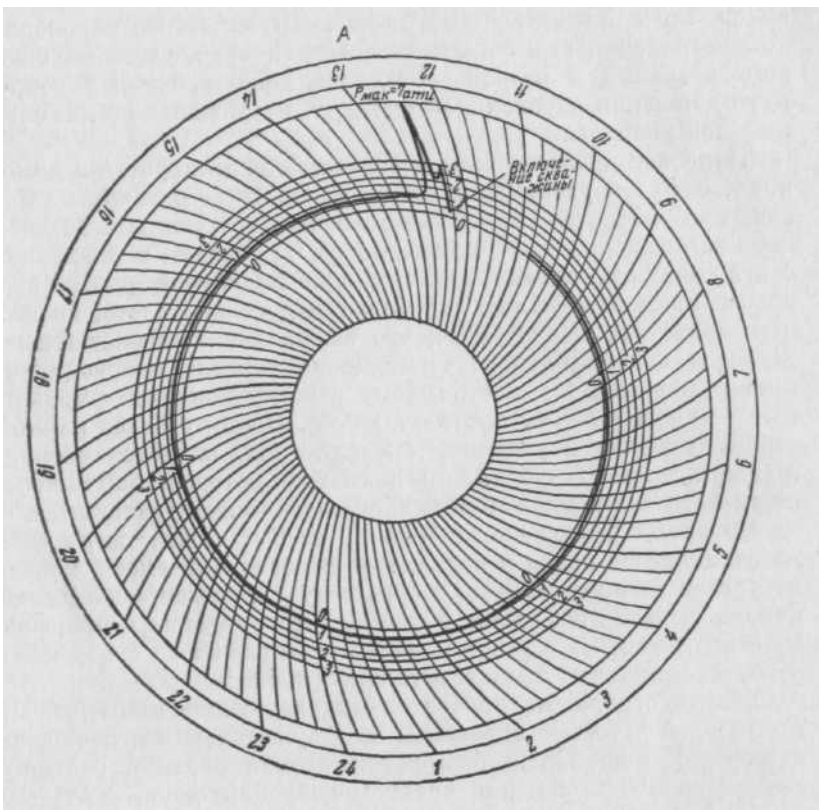
Во время разведочного бурения в обстановке, когда еще неизвестны водообильность пород и параметры пароводяной смеси, конструкция скважин, естественно, часто не соответствует оптимальной. Диаметр обсадных колонн бывает либо очень большим, что приводит к прерывистому режиму, либо, наоборот, слишком малым, что влечет за собой некоторое искусственное снижение производительности скважины.

В этом отношении показательны следующие примеры. При опробовании первой роторной скважины на Паужетском месторождении на интервале от 120 до 196 м был зафиксирован средний расход пароводяной смеси около  $6 \text{ кг/сек}$  при среднем давлении около 3 ата. Вместе с тем, работа скважины имела ярко выраженный гейзерный характер. Это было связано с тем, что для данных условий относительно низкой водообильности ствол скважины, имевшей диаметр около 10 дюймов, был очень широк.

Колонковая скв. 2 — дублер роторной — имела в этом интервале средний диаметр 4,5 дюйма, и приток воды в нее был несколько меньше, чем в широкий ствол роторной скважины. Несмотря на это, был достигнут непрерывный режим извержения, хотя и со значительными пульсациями. Расход пароводяной смеси при среднем давлении около 3 ата составил  $3 \text{ кг/сек}$ , т. е. всего вдвое меньше, чем было зафиксировано на роторной скважине.

С другой стороны, на Паужетском месторождении имелись разведочные скважины, которые, находясь в благоприятных гидрогеологических условиях, обладали недостаточно широким диаметром, что препятствовало максимальному проявлению парлифта. К ним относится, в частности, наиболее производительная разведочная скв. 4. Она имела конечный диаметр 112 мм и была пробурена на глубину 275,9 м. Поступление воды в ствол происходило из крупных трещин в призабойной части скважины. Режим извержения пароводяной смеси этой скважины отличался очень большим постоянством. При свободном фонтанировании ее расход достигал  $40 \text{ кг/сек}$ , а уровень парообразования находился, по опытным данным, на глубине около 200 м. Можно полагать, что если бы скв. 4 имела большой диаметр — порядка 6—8 дюймов, парообразование в ней произошло бы на большую глубину, и приток воды в ствол происходил более интенсивно (без учета дополнительного притока за счет большого диаметра). По расчетам, понижение уровня парообразования до забоя могло бы обеспечить расход пароводяной смеси до  $60 \text{ кг/сек}$ .

Таким образом, решение вопросов эксплуатации пароводяных скважин самым тесным образом связано с особенностями их гидродинамики.



И если обеспечение больших водопритоков достигается в общем случае бурением скважин большого диаметра, то постоянный режим извержения пароводяной смеси может быть обеспечен лишь в том случае, если в эксплуатационной колонке не развиваются процессы опережающего движения паровой фазы. Выбор эксплуатационной колонны нужного диаметра возможен, очевидно, лишь после гидрогеологического опробования, по получении необходимых данных о водообильности скважины и тепловых параметрах пароводяной смеси.

Изменения в расходе и величине энтальпии пароводяной смеси отражаются на величине давления пара на устье скважины. Указанные взаимоотношения между меняющимися расходом и паросодержанием, с одной стороны, и давлением на устье — с другой, были изучены при детальном исследовании пароводяных скважин с пульсирующим и гейзерным режимом.

О характере этих взаимоотношений дает представление следующий пример. При опробовании скв. 2 было установлено, что она имеет резко выраженный пульсирующий режим с продолжительностью циклов 20—25 мин. После обработки результатов измерений выяснилось, что средние величины параметров за цикл составили по расходу 3,1 кг/сек, по теплоемкости — 175 ккал/кг и по давлению — 2,65 ата. Все эти величины могут быть нанесены на график  $Q = f(P)$ . Однако они сугубо расчетны, так как в действительности значения параметров, близкие к средним,

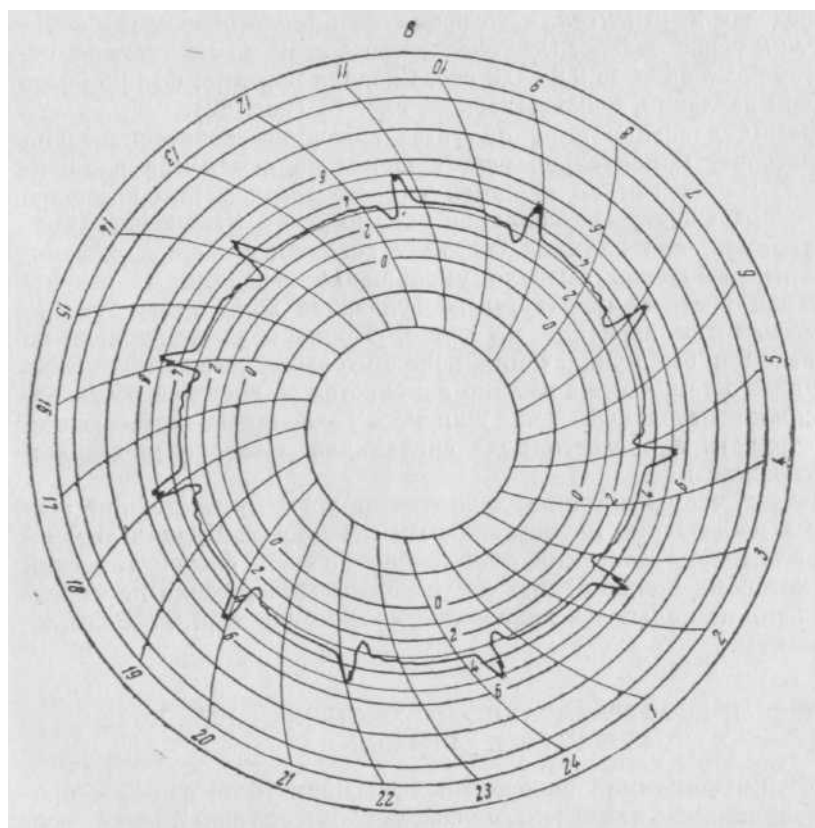


Рис. 41. Диаграммы давления пара на устье Паужетских скважин

А — скв. К-7 — постоянный режим извержения пароводяной смеси, прибор МГ-410, поставлено 17.IV 1960 г., снято 18.IV 1960 г.; Б — В — разновидность пульсирующего режима:  
 Б — скв. К-13, поставлено 14.VI 1961 г., снято 15.VI 1961 г.; В — скв. К-12, поставлено 25. IX 1960 г., снято 26.IX. 1960 г.



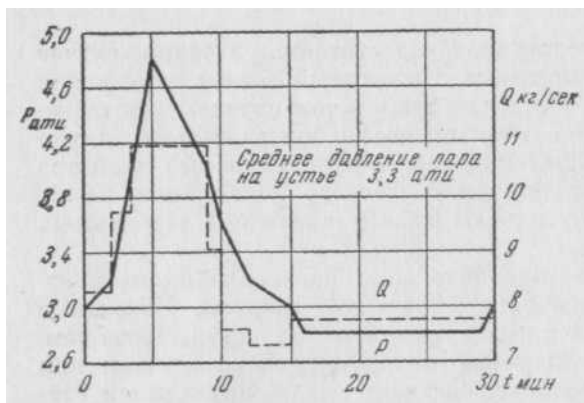


Рис. 42. Изменение дебита и давления на устье пульсирующей скв. К-13 в течение цикла извержения

не выдерживались хоть сколько-нибудь продолжительное время. Начало цикла ознаменовалось резким повышением давления с 1,8—1,9 до 3,1—3,2 *ата*. При этом фиксировались наибольшие значения дебита 7—8 *кг/сек*, хотя теплосодержание пароводяной смеси было минимальным — около 140 *ккал/кг*. Развитие извержения сопровождалось уменьшением расхода до 2 *кг/сек* и ростом теплосодержания пароводяной смеси до 220 *ккал/кг*. В течение первых 2—3 *мин* уменьшение расхода проис-

ходило очень быстро, поэтому, несмотря на рост паросодержания, давление на устье падало до 2,7—2,6 *ата*. В дальнейшем, однако, давление держалось практически на одном уровне — 2,5—2,6 *ата*, так как относительно незначительное уменьшение расхода (компенсировалось ростом паросодержания). Всю вторую половину цикла величина расхода почти не менялась, находясь в пределах 2—3 *кг/сек*, в то время как теплосодержание в последние 4—5 *мин* резко падало. Соответственно с этим на манометрах отмечалось падение давления до 0,8—0,9 *ата*. Сходная картина, но при более высоком среднем давлении, наблюдалась на скв. 13 (рис. 42).

Таким образом, давление пара на устье скважины является весьма чувствительным индикатором, моментально реагирующим на изменения в режиме извержения. Изменения во внешней гидрогеологической обстановке также, вероятно, отражаются на давлении пара на устье. Уменьшение притока воды, например, при влиянии соседних скважин в период опытно-эксплуатационных выпусков вызвало уменьшение давления. В результате падения или роста температуры поступающей воды также уменьшится или увеличится давление на устье. Таким образом, только по изменению давления без привлечения дополнительных сведений нельзя однозначно судить о том, что же именно изменяется во внешней обстановке. Однако «самопроизвольный» спад или рост давления на устье всегда нужно рассматривать как своего рода сигнал для нового обследования пароводяной скважины.

Отсюда следует, что регистрация давления на устье — важнейший элемент режимных наблюдений на пароводяных скважинах. Будучи автоматизирована, регистрация давления дает очень ценный систематический материал, по которому можно судить как о режиме извержения пароводяной смеси, так и о стабильности гидрогеологических условий на месте заложения скважины.

### ХИМИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ВЫСОКОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД ПРИ РАБОТЕ СКВАЖИН

С особенностями динамики пароводяных скважин тесно связаны процессы дифференциации химического состава высокотермальных вод, вскрываемых скважиной. По мере того, как образуется паровая фаза, в нее переходят легко летучие вещества, растворенные в воде. Вода при этом дегазируется и, кроме того, обедняется некоторыми солями. В отношении же основной массы солей вода становится более концентрированной.

Для того, чтобы иметь правильное представление о химическом составе пароводяной смеси и той воды, которая вскрывается на глубине скважины, необходимо, во-первых, знать состав паровой фазы и состав воды на выходе, и во-вторых — соотношение количеств воды и пара при отборе проб на анализ.

Состав паровой фазы имеет очень важное практическое значение сам по себе, так как от него зависит выбор схемы использования пара на проектируемой геотермической электростанции.

При химическом опробовании особые трудности возникают в тех случаях, когда скважина имеет гейзерный режим. В стадию парения вода, находящаяся в скважине, сильно дегазируется, а концентрация солей, как показали наблюдения, увеличивается в ней почти вдвое. Поэтому во время извержения первые порции пароводяной смеси оказываются чрезвычайно бедными газом и обладают повышенной минерализацией. Данные их анализа, очевидно, не могут быть распространены на выводы о водах в целом. Точно так же не могут считаться характерными и данные, получаемые в результате анализа проб пара, отобранных в стадию парения и в конце извержения, когда количество пара по отношению к воде становится очень большим. И только примерно в середине извержения, когда на поверхность поступают порции воды, не подверженные предварительно дегазации, анализ может отражать действительный состав воды на глубине.

Поскольку отбор проб занимает значительное время (в среднем около 1 часа), скважина с гейзерным режимом может быть удовлетворительно опробована, если стадия извержения у нее длится несколько часов. Если же стадия извержения непродолжительная, то при отборе одной пробы в нее неизбежно будут поступать порции пара с разной концентрацией газов и, что также важно, в равном соотношении с водой. Поэтому при интерпретации данных химического анализа по скважинам с гейзерным и пульсирующим режимом следует очень осторожно относиться к приводимым цифрам, особенно по газовому составу, имея в виду, что они могут характеризовать случайные временные концентрации.

## **ИСПЫТАНИЯ ОДИНОЧНЫХ ПАРОВОДЯНЫХ СКВАЖИН**

Программа испытаний пароводяных скважин составлялась в расчете на то, чтобы в ходе опробования были получены исходные данные, достаточные для составления как гидрогеологической, так и энергетической характеристик скважины.

К числу важнейших исходных данных относятся следующие.

### **1. Теплофизические данные**

- а) температура в выстоявшейся скважине;
- б) энтальпия пароводяной смеси на выходе;
- в) давление пара на устье скважины.

### **2. Гидродинамические данные**

- а) положение статического уровня термальной воды или величина пластового давления;
- б) дебит скважины при различных давлениях пара на устье;
- в) положение уровней парообразования при различных расходах;
- г) режим извержения пароводяной смеси при различных давлениях пара на устье.

### **3. Химические данные**

- а) химический состав воды;
- б) химический состав пара;
- в) весовое соотношение воды и пара при отборе проб на анализ.

Анализ этих данных позволяет оценить энергетическую мощность скважины, наметить рациональный эксплуатационный режим и осветить гидрогеологические условия на месте ее заложения.

Необходимо иметь в виду, что уверенно опираться на полученные данные можно лишь при условии, если конструкция и оборудование скважин соответствуют определенным требованиям, а именно: соблюдены качественный цементаж обсадных колонн и безупречное оборудование устья, исключающее утечки. В противном случае, в действующих пароводяных скважинах при разных режимах может быть либо поглощение в верхний безнапорный водоносный горизонт, либо наоборот — отсасывание из него. При наличии утечек на оголовке невозможно замерить статический уровень и подготовить скважину к термометрии.

Последовательность отдельных операций при опробовании изменялась в зависимости от конкретных условий. Однако по большей части выдерживалась следующая последовательность. В первую очередь производились операции по замерам температур в скважине и определению статического уровня термальной воды. Этим замерам предшествовало выстаивание скважины в течение нескольких дней, которые использовались для оборудования устья оголовком и подготовки и монтажа измерительных устройств. На следующем этапе устанавливался полный диапазон давлений пара на устье скважины, и наблюдался режим извержения пароводяной смеси при разных давлениях. В ходе этих работ обычно уже вырисовывалась предварительная характеристика скважины. Наконец, на третьем, заключительном этапе, получались точные сведения о производительности скважины, теплосодержании пароводяной смеси и ее химическом составе.

## **Подготовительный этап опробования**

### *Оборудование устья скважины*

Проведению гидрогеологических испытаний предшествовало оборудование устья скважин специальными оголовками. Они установлены непосредственно над главными задвижками. Ответительные штуцеры оголовка, один из которых используется для выпуска пароводяной смеси в атмосферу, а другой — для направления ее в измерительные устройства, снабжены линейными задвижками. Верх оголовков оборудован съемной заглушкой. К боковому отводу, по которому пароводяная смесь выбрасывается в атмосферу, крепится труба с набкой для подсоединения переносного циклонного сепаратора, используемого при химическом опробовании скважины, и уже после этой трубы — регулирующая боковая задвижка. К задвижке обязательно присоединяется выбросной патрубок длиной 80—100 см для защиты ее от коррозии и безопасного открытия или закрытия задвижки. В корпус оголовков вварены маленькие штуцеры для подсоединения манометров. В качестве прокладочного материала на фланцевых соединениях труб и задвижек использовался паранит.

Конкретная конструкция оголовка выбиралась в соответствии с дебитом скважины, оцененным визуально при пробном выпуске. Для скважины с небольшим дебитом вполне применим оголовок-крестовина, сваренный из отрезков обсадных труб сравнительно небольшого диаметра (до 100 мм). Такой оголовок весьма прост в изготовлении, а отдельные узлы его имеют небольшой вес. Это дает возможность устанавливать оголовок вручную. Однако, указанная конструкция не является универсальной, так как она не пригодна для пропуска большого расхода пароводяной смеси. Поэтому на высокодебитных скважинах устанавливались оголовки, сваренные из труб большого — до 8 дюймов диаметра.

## *Определение статического уровня термальной воды*

При опробовании артезианских скважин данные о положении статического уровня необходимы, чтобы иметь представление о величине и распределении пластового давления. Это давление можно измерить непосредственно, опустив в скважину на нужную глубину глубинный манометр. Однако на большинстве гидрогеологических объектов величина пластового давления более точно рассчитывается, учитывая положение статического уровня.

На пароводяных скважинах все эти работы значительно усложняются. Принципиально здесь возможно применение глубинных манометров. Однако приборы, которые выпускаются в настоящее время промышленностью, приспособлены в основном для нужд нефтяников. Те глубинные манометры, с которыми можно работать при высоких температурах (100—200°), рассчитаны на очень большие давления. В связи с этим на объектах, где 100—200° температуры фиксируются на первых сотнях метров, а пластовые давления относительно невелики, подобные приборы не обеспечивают необходимой точности. В то же время более точные приборы, рассчитанные на меньшие давления, как правило, не приспособлены к высоким температурам. Опыта применения глубинных манометров на пароводяных скважинах пока не имеется.

Положение статического уровня в самоизливающихся скважинах определяется по замеру напора воды манометром. В скважинах несамоизливающихся положение уровня можно определить обычной хлопущкой.

На сильно прогретых участках, расположенных в пределах естественной термальной площадки, нередки случаи, когда в верхней части ствола закрытых скважин образуется пар. В этом легко убедиться, измерив температуру в приустьевой части скважины и сравнив ее с табличной температурой насыщенного пара при том давлении, которое зарегистрировано манометром. Очевидно, в данном случае показания манометра относятся к давлению пара, а не воды, и использовать их для расчетов статического уровня нельзя. Следует подчеркнуть, что вскипание при закрытой задвижке может также начаться и в тех скважинах, устье которых герметизировано недостаточно надежно.

В том случае, когда в приустьевой части скважины находится пар, статическое давление (давление насыщенного пара) периодически изменяется, причем амплитуда колебаний может достигать одной атмосферы и больше. На диаграмме давления запись давления пара в закрытой скважине имеет характерный пилообразный вид. Практически, по характеру диаграммы давления закрытой скважины можно определить пар или вода находится в верхней части ствола скважины, не прибегая к измерению температуры.

Причины колебания давления пара на устье закрытой скважины недостаточно ясны. Можно предположить, что они связаны с частичной конденсацией пара в процессе отдачи тепла на оголовке и вообще в приповерхностной части скважины. При этом изменяется объем и давление (минимум на диаграмме), затем образование новых порций пара за счет вскипания перегретой воды повышает давление на устье (на диаграмме максимум давления).

Определение статического уровня в таких скважинах в последнее время, по предложению В. М. Сугрובה, проводилось с помощью закачки в них под давлением холодной воды. Таким способом, были определены статические уровни несамоизливающихся скв. 13, 20, 21 и самоизливающихся скв. 12 и 16.

Холодная вода конденсировала имеющийся пар, охлаждала приповерхностную часть скважины и частично нагнеталась в пласт, что приводило в первый момент к понижению естественного статического уровня. Для

определения положения статического уровня после закачки проводились наблюдения за восстановлением уровня и температурой воды. В тех скважинах, в которых статический уровень располагается ниже устья, измерения можно было проводить обычной хлопущкой, а в скважинах самоизливающихся наблюдения за восстановлением статического давления производятся по самопишущему или показывающему манометрам. В этом случае требуется обязательное измерение температуры на устье скважины. В несамонизливающих скважинах наблюдения проводились, обычно, до начала кипения или пароводяного выброса.

Перед началом кипения уровень сильно колеблется из-за образования пузырьков пара и одновременно конденсации. Перед выбросом, когда температура достигает точки кипения при данном давлении, начинается быстрый подъем уровня, после чего начинается извержение пароводяной смеси.

Определение статического уровня в скважинах с высокой температурой показало, что время закачки и количество холодной воды тем больше, чем ниже положение статического уровня и, следовательно, больше температура на его отметке.

Статические уровни, определенные описанными выше способами, отражают пластовое давление в том случае, если объемный вес воды на исследуемой площади приблизительно одинаков. Если объемный вес изменяется по площади, то необходимо при расчете пластового давления учитывать влияние объемного веса. Изменение объемного веса термальной вод связано с изменением температуры.

Расчет пластового давления производится по известной формуле

$$P_{\text{пласт}} = P_{\text{стат}} + \frac{h_{\text{стат}} \gamma_{\text{ср}}}{10}$$

или более точно

$$P_{\text{пласт}} = P_{\text{стат}} + \frac{h_1 \gamma_1}{10} + \frac{h_n \gamma_n}{10},$$

где  $h$  — высота столба воды в скважине, для которого по данным термометрии определено среднее значение объемного веса ( $\gamma$ ).

Учет объемного веса при расчетах пластового давления на высокотемпературных скважинах совершенно необходим, так как уже при  $170^\circ$  плотность пресной воды составляет всего  $0,9 \text{ г/см}^3$ . На Паужетском месторождении в ряде случаев приведенный к нормальному объемному весу статический уровень отличается от замеренного почти на  $20 \text{ м}$ . Отсюда следует, что замер напора манометром должен обязательно сопровождаться термометрией в закрытой скважине.

#### *Наблюдение за режимом работы скважины при различных давлениях пара на устье*

Подготовительные работы завершались комплексом наблюдений за режимом работы скважины в полном диапазоне давлений пара на ее устье. Это позволяло наметить рациональную схему измерений и производить их впоследствии при таких давлениях, когда извержение пароводяной смеси протекает наиболее ровно. Кроме того, выявление режима работы скважины давало возможность оценить ее качество в отношении энергетического использования.

Наблюдения за режимом работы скважин начинались, обычно, при полностью открытых задвижках, т. е. при минимальном рабочем давлении (часто принимался и обратный порядок). Переключение скважины с одного режима на другой производилось с помощью линейной задвижки на ответвительном штуцере. По мере уменьшения проходного отверстия

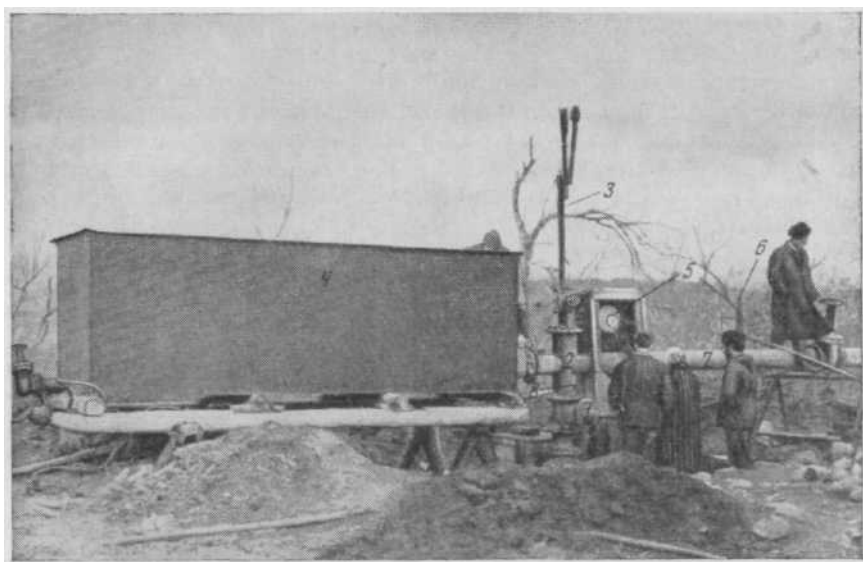


Рис. 43. Оборудование устья пароводяной скважины (К-11) в период испытаний  
 1 — основная задвижка; 2 — оголовок-крестовина; 3 — лубрикатор; 4 — калориметр; 5 — самопишущий манометр; 6 — переносный сепаратор; 7 — выпускная линия; 8 — точка снятия давления. Фото В. И. Кононова

давление пара на устье скважины возрастает, а расход уменьшается. В зависимости от того, в каком диапазоне давлений работает скважина, выбиралось три — пять прикрытий задвижки. Главная же задвижка оставалась все время полностью открытой.

Подкручивание линейной задвижки производилось до тех пор, пока уменьшение проходного сечения сопровождалось повышением давления на устье. Максимальное рабочее давление на большей части скважин устанавливается тогда, когда линейная задвижка прикрыта на  $3/4$ — $4/5$  своего сечения. Дальнейшее уменьшение проходного отверстия вызывает уже не рост, а спад давления.

Режим извержения при каждом новом положении задвижки в скважинах бывает разный. Высокодебитные скважины очень быстро приспосабливаются к вновь созданным условиям, и новое среднее давление на их устье устанавливается буквально в течение нескольких минут. На малодобитных скважинах перестройка режима их работы сопровождается следующими характерными явлениями. Подкручивание задвижки вызывает первоначально не рост, а наоборот — спад давления на устье. Скважина резко снижает свою деятельность, а иногда вообще глохнет и временно перестает работать. Постепенно, однако, давление повышается и по истечении сравнительно длительного времени, иногда только через сутки, достигает какого-то нового среднего значения. Выявление таких конкретных деталей на каждой скважине значительно способствует дальнейшему опробованию. Наблюдения за режимом работы скважины при заданном давлении производились от одних до нескольких суток после стабилизации процесса извержения пароводяной смеси.

Основные данные о режиме работы скважины (время стабилизации режима, степень его постоянства, продолжительность циклов извержения и перерывов при гейзерном и пульсирующем режиме) давала запись давления на устье, которая производилась с помощью самопишущих манометров. Давление снималось на участке между главной задвижкой скважины и поворотом в ответственный штуцер оголовка (рис. 43).

Самопишущие манометры устанавливались в непосредственной близости от устья скважины и защищались от дождя и снега специальными ящиками. Параллельно с самопишущими манометрами включался показывающий манометр, служащий для контрольных и визуальных наблюдений. При установке манометров предусматривалась возможность контроля нулевого положения стрелки и продувки импульсной трубки. Для этого перед манометрами устанавливался вентиль, связывающий импульсную трубку с атмосферой.

### **Методы и аппаратура для оценки расхода и качества пароводяной смеси**

Замеры расхода пароводяной смеси производились при различных значениях давления пара на устье скважины. Одна точка выбиралась вблизи максимального рабочего давления, которому соответствует наименьший расход; вторая точка с наибольшими расходами — при наименьшем давлении на устье; промежуточные значения расхода измерялись при средних рабочих давлениях. После определения расходов, соответствующих различным давлениям на устье, строился график  $Q - f(P)$ .

Наименьшее давление на устье и максимальная производительность скважины наблюдаются при свободном вертикальном фонтанировании. Однако способов для достаточно точного замера расхода при свободном фонтанировании не имеется. Поэтому, как уже указывалось, надо стремиться применять такие конструкции измерительных устройств и подводящих трасс, которым соответствует наименьшее сопротивление выхода пароводяной смеси.

Основные трудности, возникающие при замерах дебита пароводяной скважины, заключаются в том, что непосредственные измерения расхода в потоке пароводяной смеси не дают точных результатов. Для производства замеров необходимо предварительно либо сепарировать смесь на пар и воду, либо наоборот — полностью конденсировать ее, приводя к однофазной среде. В первом случае используются различного рода сепараторы, во втором — калориметры. Лишь в некоторых случаях, когда не нужна большая точность измерений ради простоты их осуществления, могут быть применены устройства для непосредственных замеров в пароводяной смеси. Таким образом, опробование пароводяных скважин требует применения разнообразных устройств и приборов и нуждается в весьма высокой общей технической оснащенности разведочных партий.

При выборе измерительных устройств был использован опыт опробования пароводяных скважин в Новой Зеландии, где первоначальные испытания скважин проводились в основном с помощью калориметра. На скважинах, вводимых в эксплуатацию, применялись циклонные сепараторы, конструкция которых определялась в ходе экспериментальных работ.

Имеющийся опыт показывает, что основными аппаратами для измерения продукции пароводяных скважин являются сепараторы и калориметры. При этом в условиях разведки наиболее рационально применение калориметров в комбинации с различного рода вспомогательными устройствами. При длительных режимных наблюдениях на эксплуатационных скважинах применима более совершенная система измерений, которую обеспечивают стационарные установки.

### *Калориметры*

На Паужетском месторождении наибольшее развитие получило применение большого  $8 \text{ м}^3$  калориметра (см. рис. 43). Он представляет собой мерный бак, который, как показывает его название, предназначен в пер-

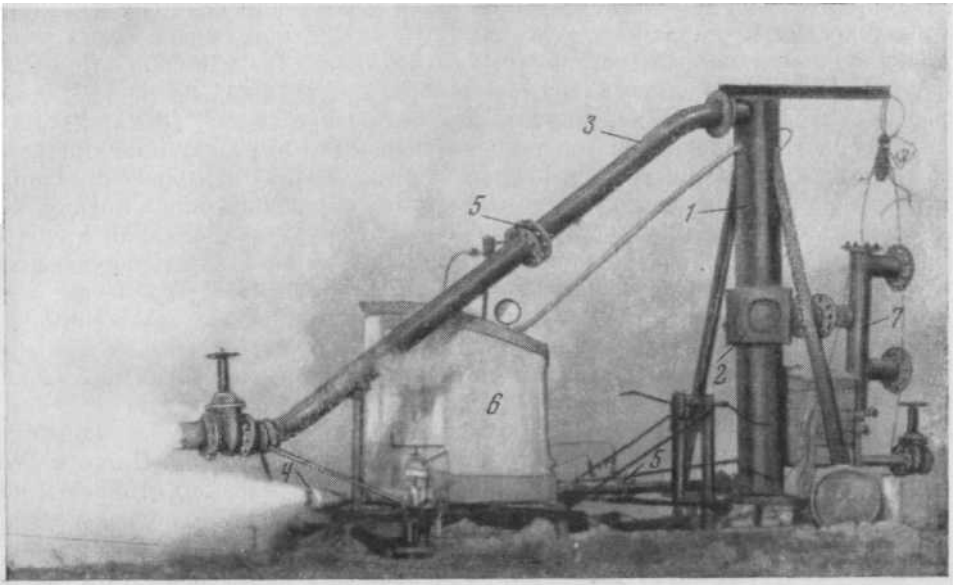


Рис. 44. Передвижной циклонный сепаратор (смонтирован на санях).

1 — циклон; 2 — улитка циклона; 3 — паровая линия; 4 — водяная линия; 5 — расходомерные устройства; 6 — будка для измерительных приборов; 7 — оголовки на пароводяной скважине  
Фото В. М. Сугрובה

вую очередь для измерения теплосодержания. Однако его с успехом можно использовать как простейший мерный сосуд для измерения расхода. Принцип действия калориметра заключается в охлаждении поступающей в него пароводяной смеси с полной конденсацией пара холодной водой, которая заливается в бак перед замером.

При измерениях в калориметре теплосодержание пароводяной смеси рассчитывается по формуле

$$i_{\text{пвс}} = \frac{M_K t_K C - M_H t_H C}{M_K - M_H},$$

где  $i_{\text{пвс}}$  — теплосодержание пароводяной смеси в  $\text{ккал/кг}$ ;  $M_H$ ,  $M_K$  — начальная и конечная масса воды в калориметре в  $\text{кг}$ ;  $t_H$ ,  $t_K$  — начальная и конечная температура в калориметре в  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C$  — теплоемкость воды (равна  $1 \text{ ккал/кг град}$ ).

Одновременно с определением теплосодержания производится обычно и замер расхода пароводяной смеси, рассчитываемый по формуле

$$Q = \frac{M_K - M_H}{\tau},$$

где  $Q$  — расход пароводяной смеси в  $\text{кг/сек}$ ;  $\tau$  — время производства замера в  $\text{сек}$ .

Определение расходов и теплосодержания калориметром производилось с учетом режима извержения пароводяной смеси. В случае постоянного установившегося режима число замеров расхода на каждой ступени давления было не меньше 5—10. Основной объем измерений теплосодержания — не менее 10 замеров — выполнялся при каком-либо одном значении давления; при других же значениях давления делались контрольные замеры. При гейзерном и пульсирующем режимах число замеров сильно увеличивалось, чтобы иметь возможность вычислить усредненные параметры.



Калориметры, применяемые при опробовании пароводяных скважин, имеют весьма простую конструкцию (рис. 44). Главным элементом установки является мерный резервуар, как правило, строго параллелепипедной формы. Измерение объема воды в резервуаре ведется по специальной градуированной рейке, укрепленной в центре бака (цена деления рейки 50 л). Температура воды меряется обычно вручную максимальными ртутными термометрами в разных частях бака. В комплект с калориметрической установкой входит мотопомпа, обеспечивающая подачу холодной воды. С нижней части резервуара оборудуется сливная труба с краном или задвижкой. Калориметр монтируется на санях и перевозится от одной скважины к другой трактором или автомашиной.

Особо должна быть охарактеризована система включения калориметра и ввода в него пароводяной смеси. Совершенно необходимо, чтобы три пуска пароводяной смеси в калориметр режим ее извержения не был нарушен.

Иными словами, во время работы калориметра на оголовке скважины должно быть то же самое давление пара, что и до включения. В противном случае, как бы ни были точны замеры, их нельзя уверенно отнести к какому-то определенному давлению на устье скважины, т. е. нельзя построить график производительности.

Калориметр, используемый для замеров, был оборудован для ввода пароводяной смеси специальной перфорированной 200 мм трубой, имеющей такую же длину, как и сам калориметр, и сваренный в нижней части бака. Суммарная площадь отверстий в трубе примерно вдвое превышала площадь ее сечения, что практически исключало дополнительные сопротивления при выходе пароводяной смеси. При таком устройстве оголовков скважины оборудуется двумя боковыми патрубками, один из которых направлен в атмосферу, а другой соединяется с перфорированной трубой и используется для ввода пароводяной смеси в калориметр. Они оборудуются задвижками и кранами, рассчитанными на соответствующие давления пара.

Перед началом измерений производилась предварительная работа по уравниванию сопротивлений обеих трасс с помощью задвижек так, чтобы включение калориметра не отражалось на режиме извержения. Положение «равновесия» фиксировалось. Включение калориметра в отдельных случаях производилось с помощью крана, при этом один рабочий перекрывал боковой отвод для выпуска в атмосферу, а другой — в тот же момент включал трассу на калориметр. Прекращение выпуска производилось таким же путем. В результате работа скважины практически не останавливалась.

На отводах большого диаметра операции по включению калориметра производились одними задвижками. Однако в этом случае, поскольку полное открытие и закрытие задвижки требует значительного времени (минимум 10 сек), режим извержения пароводяной смеси сразу после включения калориметра несколько нарушается и лишь по прошествии некоторого времени приобретает прежний характер. Если на измерениях теплосодержания это практически не отражается, то в замеры расхода изменение режима может внести существенные ошибки. Для устранения подобных ошибок применялось специальное электроконтактное устройство, смонтированное на измерительной рейке с разносом контактов, соответствующим приросту воды в  $1 \text{ м}^3$  или водомерное стекло, на котором была отмечена по рейке высота, равная  $1 \text{ м}^3$ . Принцип работы с этим устройством заключается в том, что регистрация объемов начинается тогда, когда режим извержения пароводяной смеси уже заведомо стабилизируется. Измерения начинаются, когда уровень воды достигает нижнего контакта или метки. В этот момент включается секундомер. При соприкосновении уровня воды с верхним контактом (верхней меткой) се-

кундомер останавливается. Таким путем получают необходимые данные для расчета расхода. Подобная система измерения значительно расширяет пределы применения калориметра.

При хорошей технической оснащенности работа с калориметром может быть еще более усовершенствована. В частности, если насосы, закачивающие в калориметр холодную воду, достаточно мощны и могут работать длительное время, то подачу холодной воды и слив из калориметра можно отрегулировать таким образом, чтобы при пуске пароводяной смеси и ее конденсации бак не переполнялся. Расход пароводяной смеси определяется как разница между расходом воды на сливе из калориметра и расходом холодной воды. Линии, по которым подается холодная вода и происходит слив, могут быть оборудованы мерными устройствами (например, водосливами), а запись расходов автоматизирована.

Такая система измерений была осуществлена на Паужетке В. М. Сугробовым. Опыт показал, что измерения подобного рода уточняют замер дебита скважины, особенно с пульсирующим режимом, так как исключаются ошибки в измерении, возникающие за счет нарушения режима давления при пуске смеси в калориметр.

При замерах теплосодержания особое внимание обращается на возможно более равномерное перемешивание пароводяной смеси с холодной водой. Рост температуры в калориметре допускается до 70—80°. Если же при длительных замерах конечная температура в калориметре превышает указанные пределы, то вносятся поправки на остывание в зависимости от температуры воздуха, определяемые опытным путем. При измерениях температур применяются термометры с ценой деления не более 1°C.

Количество пароводяной смеси, которое может быть охлаждено в калориметрах ниже 100°, обратно пропорционально ее теплосодержанию. Это определяет пределы применения калориметра как расходомера.

### *Сепарационные установки*

Как уже указывалось, сепараторы предназначены для разделения пароводяной смеси, что дает возможность производить измерения в однофазных системах. По принципу действия они подразделяются на объемные, в которых отделение пара происходит в результате его свободного улетучивания, и центробежные.

При исследованиях пароводяных скважин преимущественно используется (второй тип сепараторов, так как они по сравнению с объемными являются более компактными установками).

Принцип действия центробежного (циклонного) сепаратора заключается в следующем. Пароводяная смесь из скважины, движущаяся с большой скоростью по трубопроводу, подводится тангенциально к вертикально стоящей трубе — циклону, в специальном утолщении которого приобретает круговое движение. Развивающаяся в результате такого движения центробежная сила отбрасывает воду к стенкам циклона, а пар, как более легкий компонент смеси, собирается в осевой зоне. Стекающая вниз по стопкам вода попадает в трубу, по которой выводится наружу, пар же устремляется в паропровод. На трубопроводах, выводящих из циклона пар и воду, устанавливаются измерительные приборы — расходомеры, манометры, термометры. Специальные заборные устройства дают возможность отбирать пробы воды и пара на химический анализ. Таким образом, сепарационная установка обеспечивает большой комплекс исследований при высокой точности измерений. Измерения расходов воды и пара, а также давления могут быть полностью автоматизированы и результаты измерений зарегистрированы на диаграммах соответствующих самопишущих приборов. Такого рода документация оказывается весьма ценной при длительных наблюдениях.

Расход пароводяной смеси на сепараторе подсчитывается как сумма расходов воды и пара, замеренных отдельно; что же касается теплосодержания, то оно рассчитывается по формуле

$$i_{\text{пвс}} = i' (1 - x) + i'' x,$$

где  $i_{\text{пвс}}$  — теплосодержание пароводяной смеси;  $i'$  — теплосодержание воды при замеренном давлении;  $i''$  — теплосодержание пара при замеренном давлении;  $x$  — содержание пара (в кг) в 1 кг пароводяной смеси.

При этом в результате измерений по соотношению расходов воды и пара определяется паросодержание  $x$ , а значение теплосодержаний  $i'$  и  $i''$  берется из таблиц сухого насыщенного пара.

Выбору конструкции должна предшествовать подготовительная работа, для уточнения пределов применения сепаратора в части расходов, теплосодержания и давления. Это обусловлено тем, что высокая степень сепарации достигается только при определенных значениях скоростей пароводяной смеси в улитке и скорости подъема пара в циклоне, которые зависят от перечисленных параметров. В общем случае сепараторы, рассчитанные на работу при низких давлениях, имеют значительно большие размеры по сравнению с сепараторами высоких давлений.

Большой циклонный сепаратор, смонтированный на Паужетке в 1958 г. во время бурения роторной скважины и рассчитанный на работу при высоких давлениях, оказался неподходящим для работы при низких давлениях пара. Гораздо удачнее оказался сепаратор, сконструированный В. Г. Ренне в 1961 г. после того, как было пробурено и опробовано более десяти скважин (рис. 44). Пределы работы этого сепаратора составляют 8—10 кг/см.

### *Вспомогательные устройства*

К вспомогательным устройствам относятся приспособления, которые в комбинации с основными измерительными аппаратами, например с калориметром, позволяли достаточно просто и быстро производить комплексное опробование пароводяной скважины.

Устройства для забора средней пароводяной смеси. Оно необходимо чтобы применить аппаратуру для химического опробования скважины. Очевидно, что данные химического анализа будут действительны только тогда, когда относятся к средней пробе пароводяной смеси.

Структура потока пароводяной смеси чрезвычайно сильно зависит от паросодержания. При малом количестве пара преобладает пузырьковая и пробковая формы движения и структура потока резко неоднородна. При большом количестве пара система приобретает характер эмульсии, в которой мелкие капельки воды распределены более или менее равномерно.

Дело осложняется тем, что пароводяная смесь прежде, чем достигнет парозаборного устройства, испытывает частичную сепарацию при переходе из вертикального ствола скважины в горизонтальный отвод. Структура потока нарушается также при прохождении смеси через сужающие устройства, задвижки и т. д. Поэтому в общем случае, в разных частях сечения трубопровода паросодержание различно.

Для забора пароводяной смеси использовалось так называемое пропорциональное устройство. Оно представляет собой трубку, вставленную в трубопровод поперек движения потока. В трубке имеются отверстия, площадь которых пропорциональна соответствующим кольцевым сечениям трубопровода, благодаря чему отбираемая проба оказывается близкой к средней. Конец трубки, выступающий из трубопровода, снабжен резьбой для подсоединения малого циклонного сепаратора.

Переносные циклонные сепараторы. Малогабаритные циклонные сепараторы получили в условиях паужетской разведки очень широкое применение. Они изготавливаются из отрезков труб малого диаметра и имеют небольшой вес — всего несколько кг; производительность их невелика — несколько кг/час по пару.

Из измерительных приборов эти сепараторы снабжены обычно только манометром, показывающим давление, при котором происходит сепарация. На вводной и выводных трубках устанавливаются регулировочные вентили. При хорошей регулировке поступления в сепаратор пароводяной смеси сухость отделенного пара достигает почти 100%. Такие сепараторы присоединяются к парозаборному устройству, укрепленному в отрезке трубы, равной по диаметру трубам, отходящим от оголовка. Отрезок трубы снабжен фланцами. Таким образом, составляется целый узел, который легко переносится с одной скважины на другую.

Малогабаритные сепараторы использовались главным образом при химическом опробовании. В этом случае переносный узел устанавливался на отводе для пароводяной смеси между оголовком и задвижкой на отводе. В. М. Сугробовым и Т. В. Ренне экспериментально было установлено, что оптимальные условия для забора средней пробы создаются при сильно закрытой задвижке на отводе, когда, скорости в трубопроводе не очень велики. При больших скоростях данные анализа по пару очень сильно колеблются. Соотношение количеств воды и пара при отборе проб рассчитывалось, исходя из известного теплосодержания, измеренного в большом калориметре, с учетом давления на сепараторе.

Устройства для непосредственного измерения расхода пароводяной смеси. Приближенные значения расхода пароводяной смеси могут быть получены путем непосредственных измерений ее потока. Для этих целей применялись сужающие устройства — конические насадки и диафрагмы. Расход рассчитывался по перепаду давлений, получающемуся при прохождении пароводяной смеси через сужающееся отверстие:

$$Q = C V \sqrt{h \gamma_{\text{пвс}}}$$

где  $Q$  — расход пароводяной смеси;  $h$  — перепад давлений;  $\gamma_{\text{пвс}}$  — удельный вес пароводяной смеси в условиях измерения;  $C$  — коэффициент пропорциональности.

Возможность применения таких устройств связана с тем, что при низких давлениях двухфазная система приближается по своим свойствам к гомогенной. Так например, удельный объем пароводяной смеси с теплосодержанием 180 ккал/кг при давлении 2 атм имеет величину около 100 л/кг, т. е. в 100 раз больше, чем у воды и всего в 9 раз меньше, чем у пара. В отношении вязкости пароводяная смесь при таких условиях также стоит гораздо ближе к пару, чем к воде. Таким образом, с известным приближением ее можно рассматривать как пар с очень большой влажностью. В связи с этим сужающие устройства для пароводяной смеси работают по существу как паромеры.

Величина удельного веса пароводяной смеси, необходимая для определения расхода, берется по вспомогательному, заранее построенному графику либо рассчитывается по приведенной выше формуле 2.

Проверка значения расхода пароводяной смеси, рассчитанного по формуле для паромера, обнаруживает, как правило, значительные погрешности. Поэтому сужающие устройства перед их эксплуатацией проходят предварительную тарировку. При тарировке экспериментально устанавливается поправочный коэффициент —  $K_s$ , который вводится затем в расчетную формулу

$$Q \equiv K_s V \sqrt{h \gamma_{\text{пвс}}}$$

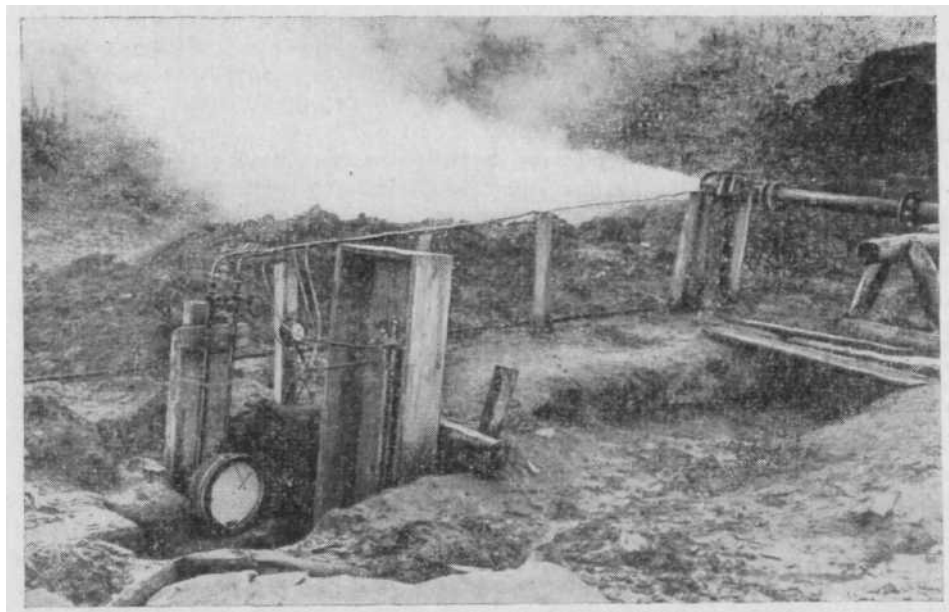


Рис. 45. Экспериментальное «дифустройство» для замера расхода пароводяной смеси  
Фото Ю. А. Краевого

На Паужетской станции для измерения расхода пароводяной смеси А. А. Гавронский применял 100 мм трубу с установленной в ней диафрагмой, получившую название дифустройства (рис. 45). Диафрагма была установлена в кольцевых камерах, имеющих отверстия для снятия давлений перед диафрагмой и после нее. Перепад давления измерялся дифманометром. Дифустройство, рассчитанное на измерение расходов до 10 кг/сек, имело небольшие габариты, легко переносилось вручную и достаточно просто, с помощью фланцев, присоединялось к боковому отводу скважины.

Поправочный коэффициент —  $K_3$ , к формуле паромера, определенный при тарировке устройства большим калориметром, оказался равен 1,6. С применением самопишущего дифманометра процесс измерений был автоматизирован.

Дифустройство испытывалось при опробовании малодобитных скважин и работало при различном режиме извержения пароводяной смеси. В условиях равномерного истечения, удельный вес смеси определялся указанным выше расчетным путем и принимался постоянным. Необходимая для расчетов величина теплосодержания была либо известна заранее — по результатам калориметрических измерений, либо определялась попутно — в средней пробе с помощью (Малогабаритного сепаратора и малого калориметра. Полученные цифры дали удовлетворительное совпадение с расходами, замеренными другими методами.

При переменном режиме точность измерений сильно снижалась, так как и паросодержание и перепад давлений на диафрагме испытывали значительные колебания.

Особенно неблагоприятное воздействие оказывали частые мелкие пульсации при истечении пароводяной смеси, во время которых показания дифманометра изменялись с такой быстротой, что было трудно установить их средние значения. Удельный вес пароводяной смеси в таких условиях нельзя было принимать постоянным и для его определения пришлось ввести непрерывное измерение паросодержания. Все вместе взятое сильно

осложняло систему измерений, в результате чего преимущества диффузности практически сводились на нет.

Кроме того, при опробовании скважин с большим дебитом габариты устройства увеличились, а точность была небольшой. Поэтому оно не нашло широкого применения при опробовании скважин.

### **Изучение химического и газового состава термальных вод**

Чтобы знать химический состав термальной воды в гласовых условиях, очевидно, необходимо определить отдельно химический состав воды и пара на устье скважины.

Пробы воды отбирались на анализ после сепарации из водяной линии сепаратора в бутылки при температуре, почти равной  $100^{\circ}\text{C}$ . В химической лаборатории по общепринятой методике определялись общие компоненты химического состава воды  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , а также  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  и  $\text{HNO}_2$ .

Методы отбора пара на химический анализ. Перед отбором проб из сепаратора устанавливалась степень сепарации. Для этой цели в конденсате пара делалось определение характерного компонента состава воды — хлора, и сепаратор регулировался до тех пор, пока этот компонент не фиксировался в конденсате пара в минимальных количествах.

Если отбор проб воды на сепараторе не сопровождается по существу никакими затруднениями, то при отборе проб пара возникает ряд осложнений. Дело в том, что при конденсации пара происходит вторичная дифференциация компонентов химического состава паровой фазы. Химически активные газы такие, как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{NH}_3$  хорошо растворяются в конденсате и образуют ионносолевые растворы, реагируя друг с другом. Как пример, можно привести образование гидрокарбоната аммония при совместном растворении  $\text{CO}_2$  и  $\text{NH}_3$ . Другие газы — азот и углеводороды, а также инертные, наоборот, в большей части остаются в газообразном состоянии. Если конденсация пара произойдет до того, как пар попадает в пароотборник, то значительная часть газов может оказаться захваченной, и анализ даст результаты, не соответствующие действительности. Поэтому при отборе проб пара, в качестве обязательного условия нужно стремиться к тому, чтобы конденсация пара происходила в системе пароотборника. В этом случае приходится подвергать анализу как газовую фазу, так и конденсат, но это обеспечивает наиболее полный учет составных компонентов пара.

Второе обязательное условие, которое нужно соблюдать при отборе проб пара, — учет количества пара, что нужно сделать, измерив объем конденсата. Если известно количество отобранного пара, то можно рассчитать и концентрацию газов в паровой фазе; по соотношению же количества пара и воды в точке отбора пробы может быть найдена также концентрация газов в воде на глубине.

Наконец, третьим условием качественного отбора пара является герметичность пароотборника. Необходимо помнить, что, как бы ни было высоко давление пара, парциальное давление отдельных газов, содержащихся в паровой фазе, в частности азота и особенно кислорода, может быть значительно меньше, чем в атмосфере. По этой причине при недостаточной герметизации в пароотборник могут попасть газы из воздуха.

Перечисленным условиям наиболее полно отвечает пароотборник конструкции К. П. Флоренского. Он представляет собой цилиндрический резервуар объемом около 200 мл, выполненный из толстого жаростойкого стекла (рис. 46). В верхней части резервуара имеется трехходовый кран, который дает возможность открывать и закрывать доступ пару и отдельно

выпускать газ и сливать конденсат. В нижней части резервуара имеется шарообразное утолщение, отделенное от цилиндра краном, но в то же время постоянно связанное с ним тонкой трубочкой. Шарообразное утолщение с помощью вакуумного шланга соединено с резиновой грушей, заполненной ртутью. К одному из отверстий трехходового крана подсоединен вакуумный шланг. Другой конец шланга соединен с резиновой растягивающейся камерой, которая в свою очередь также с помощью вакуумного шланга соединена с краном на трубочке, выводящей пар после сепарации.

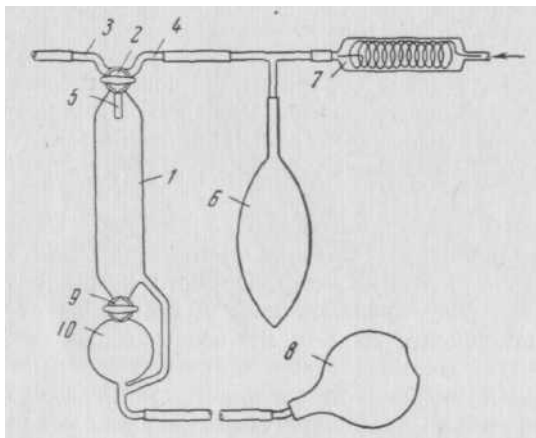


Рис. 46. Пробоотборник К. П. Флоренского

1 — баллон для дегазации; 2 — трехходовой кран; 3 — отвод для сбора газа; 4 — отвод для забора пробы пара; 5 — отвод для сбора конденсата; 6 — резиновая камера; 7 — холодильник; 8 — груша с ртутью; 9 — кран; 10 — баллон для отделения конденсата от газа

В качестве предварительной операции вначале делается пуск пара в резиновую камеру. Под давлением пара она растягивается до объема 2—3 л. После этого пусковой кран перекрывается, и пар в камере конденсируется с помощью холодной воды, которой обливают камеру снаружи. Во время этой операции трехходовой кран на стеклянном пароотборнике закрыт, а сам цилиндр заполнен ртутью.

Когда в камере образуется первая порция конденсата, трехходовой кран открывается и путем небольшого понижения уровня ртути производится всасывание конденсата и свободного газа из камеры в стеклянный резервуар. Трехходовой кран вновь закрывается. Вслед за этим производится сильное понижение уровня ртути — до тех пор, пока она вместе с конденсатом, плавающим сверху, не уйдет в шарообразное утолщение. В ходе понижения ртути в цилиндре создается сильный вакуум и газы растворенные в конденсате, переходят в газовую фазу. После вакуумирования нижний кран, отделяющий цилиндр от шарообразного утолщения, закрывают, и конденсат оказывается в своеобразной ловушке в верхней части шара. Вслед за этим газ с помощью ртути, которая поступает в цилиндр через тонкую трубочку, поднимается кверху, а трехходовым краном открывают отверстие, через которое газ может выйти наружу. По специальному шлангу газ попадает в бутылочку, заполненную концентрированным соляным раствором и, вытесняя последний, накапливается для анализа. После вытеснения газа из цилиндра, уровень ртути вновь понижают, открывают нижний кран и вытесняют ртутью уже конденсат. При этом трехходовым краном открывают отверстие для слива конденсата и собирают его в отдельную бутылочку. Затем начинают новый цикл отбора пробы, повторяя их столько раз, сколько нужно для того, чтобы набрать необходимый объем газа. Отобранные таким образом пробы газа и конденсата направляются для анализа в лабораторию. Обязательно записываются объемы газа и конденсата, а также давление на сепараторе.

Разобранная выше методика обеспечивает полный учет составных компонентов паровой фазы. Однако помимо нее применялись своего рода

экспресс-методы» для быстрого определения в паре концентраций некоторых газов. Эти методы в основном использовались при опробовании скважин, так как прибор Флоренского нельзя было применять в зимнее время из-за замерзания смазки трехходового краника. К таким газам относятся  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{NH}_3$ . Они представляют обычно большую часть общего объема газа и легко могут быть фиксированы и определены с помощью специальных жидких поглотителей, таких как растворы  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$  и  $\text{HCl}$ .

Поглотитель наливается в мерную колбу и прямо в него направляют струйку пара из сепаратора. В поглотителе пар конденсируется, а его количество вычисляется по приросту объема жидкости в мерной посуде. Обязательным условием является то, чтобы поглотитель не кипел, потому что тогда поглощение газа будет неполным. В последнее время пар из сепаратора направлялся в змеевик-холодильник, из которого конденсат пара поступал в склянку с поглотителем. Этот способ значительно ускорял и упрощал отбор проб пара на химический анализ и давал лучшие результаты.

После того, как в поглотителе набирался необходимый объем конденсата, получившийся раствор сдавался на гидрохимический анализ лаборатории, где устанавливалось количество поглощенного газа. Получившиеся цифры относились к объему конденсата определяемого газа в порции пара.

Форма выражения концентрации газов в паре может быть как объемной —  $\text{мл/л}$ , так и весовой —  $\text{г/кг}$  или  $\text{мг/кг}$ . Так как весь анализ ведется при нормальной температуре и для расчета объемных концентраций при  $100^\circ$  необходимо в полученные цифры вводить сложные поправки, применялась весовая форма, как более рациональная.