

# ОБВОДНЕННОСТЬ ПОРОД ПАУЖЕТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И УСЛОВИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ВЫСОКОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ

По результатам опробования роторной и первых колонковых скважин была принята следующая схема гидрогеологического разделения пород, залегающих в пределах месторождения. Аллювиальные валунно-галечниковые отложения заключают мощный грунтовый поток, за исключением небольших междуречных участков Паужетки, ее протоков и Лево́й Паужетки, близ их слияния. Слабопроницаемые пепловые псаммитовые туфы и туффиты местами с небольшими прослоями псефитовых пемзовых туфов представляют собой верхний относительный водоупор. Нижележащие псефитовые туфы с прослоями слабопроницаемых туфобрекчий обводнены, характеризуются наибольшей водообильностью и образуют основной водоносный напорный комплекс. Все колонковые скважины вскрыли здесь высокотермальные воды и оказались в той или иной степени производительными. Снизу псефитовые туфы подстилаются весьма слабопроницаемыми, относительно водоупорными туфобрекчиями и спекшимися витрокристаллокластическими туфами го́лыгинского горизонта (N2). Вулканомертальные песчаники анавайской серии (Pg — N1), давшие незначительный водоприток в скважину, образуют второй водоносный комплекс.

Выделение в пределах месторождения обводненных пород подтверждено данными термометрии в скважинах (табл. 6). В интервале залегания непроницаемых пепловых псаммитовых туфов и туффитов температура быстро нарастает от поверхности до их подошвы. В толще туфов температура достигает наибольших значений, а перепад температур от кровли до подошвы незначительный, что связано с насыщением пор и трещин водой с высокой температурой.

## ТРЕЩИННЫЕ ЗОНЫ И ВОДООБИЛЬНОСТЬ ПОРОД РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В циркуляции высокотермальных вод в толще агломератовых туфов большая роль принадлежит трещинам, приуроченным, видимо, к тектоническим нарушениям. Уже первые исследователи Паужетских источников обратили внимание на закономерное расположение характерных выходов термальной воды, возможно, указывающих на положение тектонических нарушений. В. В. Иванов и А. С. Нехорошее предположительно выделили на основании термометрической съемки и расположения крупных кипящих источников и гейзеров два тектонических разлома. Первый, северо-восточного простирания, намечался по линии, соединяющей источник Парящий II, Пульсирующие, Парящий I и Грязевое озерко — аз. СВ 45°, второй — по линии, соединяющей Гейзер I и источник Парящий I — аз. СЗ 315°, причем предполагалось, что падение разломов крутое, приближающееся к вертикальному.

Роторная и некоторые колонковые скважины, заложенные вблизи пересечения двух намечаемых разломов, не пересекли плоскости нарушения

Результаты поинтервального опробования роторной и первых колонковых скважин  
1, 2, 3

№ скв.	Интервал опробования, м	Породы, вскрытые в данном интервале	Характер водотока в скважину	Удельный дебит, кг/сек, м или дебит, кг/сек	Теплосодержание, ккал/кг
P-1	0—52	В интервале 0—10 м аллювиальные валунно-галечниковые отложения; с 10 до 52 м — пелловые туфы паужетской свиты	Водоприток происходит в интервале 0—10 м из поверхностной зоны растека термальных вод в очаге разгрузки. Интервал 10—52 м практически безводен	3,3—3,5	—
P-1	120—132	Туфы псефитовые андезито-дацитового состава паужетской свиты	Водоприток осуществляется по всему интервалу	0,46	—
P-1	120—196	Туфы псефитовые, внизу прослой туфобрекчий, состоящих из обломков андезитов паужетской свиты	То же	0,03 6,0	170
P-1	300—400	Туфобрекчи и спекшиеся витрокристаллокластические туфы гольтгинского горизонта	То же	0,01	175
P-1	300—500	То же	То же	0,001—0,04	165—170
P-1	300—800	То же и туфобрекчи основного состава, песчаники анавгайской серии	В алейской серии	0,39	120—135
K-1	24—102	Переслаивание пелловых и псаммитовых туфов, внизу плотные псефитовые туфы	Поступление воды по всему интервалу	0,003	—
K-1	100—237,5	Туфы псефитовые паужетской свиты	Поступление воды по всему интервалу	7,0	133
K-2	9,1—38	Туфы алевритовые трещиноватые паужетской свиты	Вода поступает из крупной трещины на глубине 33 м	10,0	134
K-2	51,2—260	Туфы псефитовые паужетской свиты	Вода поступает со всего интервала	0,03 6,0	177
K-3	6—18	Аллювиальные валунно-галечниковые отложения, внизу туфы псефитовые паужетской свиты	Вода поступает преимущественно в интервале залегания аллювия до глубины 9,0 м	6,6	—
K-3	43—52	Туфы псефитовые, переходящие внизу в пелловые	Водоприток осуществляется по всему интервалу	0,03	—
K-3	52—311	Переслаивание псаммитовых и псефитовых туфов	То же	0,003	—

или крупных трещин, но вскрыли перегретые термальные воды. Это свидетельствовало о том, что термальные воды, видимо, циркулируют также по порам и мелким трещинам в псефитовых туфах. Только скв. 4, пробуренная у подножия правой высокой террасы, на продолжении линии разлома северо-восточного простираения вскрыла крупные трещины и оказалась наиболее производительной (дебит 40 кг/сек при свободном фонтанировании). На участке этой трещинной зоны расположено большинство разведочных скважин. Все скважины, заложенные здесь, оказались продуктивными, хотя дебит каждой из них явно зависел от вскрытия обводненных трещин. Результаты бурения и опробования их показывают, что полоса тектонических нарушений имеет вид сложной зоны дробления с развитием системы оперяющих трещин.

Места пересечения скважинами плоскостей тектонических нарушений, как показывает анализ данных по бурению и гидрогеологическому испытанию их, не всегда являлись основной зоной притока воды. Напротив, в ряде случаев наиболее обводнены были трещины, оперяющие или сопряженные с тектоническими нарушениями.

Например, концентрированный приток воды в скв. 14 происходил в основном из обводненной трещины на глубине 316,4 м, а плоскость нарушения была вскрыта в приповерхностной зоне. Об этом свидетельствует поглощение бурового раствора и плохой выход керна в интервале 316,4—331 м, а также последовавший вскоре после его проходки пароводяной выброс. Высокое теплосодержание пароводяной смеси на устье, приближающееся к максимальной температуре пород, подтверждает сосредоточенное поступление воды в скважину. Скв. 20, которая пересекла трещинную зону, как уже говорилось, на глубине 85—108 м, давала пароводяную смесь с энтальпией на устье больше, чем можно было ожидать по температуре, зафиксированной в ней на этом интервале (194 ккал/кг и 168—175° С).

О сложной системе трещиноватости, сопряженной с трещинными зонами, свидетельствует то обстоятельство, что скв. 2, находящаяся в стороне от основной термальной линии, пересекла плоскость первого тектонического нарушения на глубине 38 м в толще почти непроницаемых пепловых туфов. Дебит скважины, соответствующий свободному фонтанированию при опробовании интервала 0—38 м, оказался равным 10 кг/сек. Выпуск пароводяной смеси сильно снижал уровень в грифоне источника Пульсирующего, что указывает на гидравлическую связь обводненных трещин. Скв. 10 не вскрыла непосредственно плоскость тектонического нарушения, но прошла ослабленные породы в интервале 130—160 м. Дебит скважины при свободном фонтанировании достигал 23,5 кг/сек.

Тот факт, что скважины, заложенные в пределах выделенных тектонических зон, характеризуются относительно высокой производительностью, дает возможность предполагать, что коллекторами термальных вод, обуславливающими водообильность таких участков, помимо самих тектонических нарушений, являются в основном трещины, сопряженные с ними. Системы трещин, видимо, не затрагивают толщу псефитовых туфов, залегающих между термальными линиями, что явилось причиной слабой водообильности пород таких участков. Удельный дебит скважин, пройденных в нетрещиноватых туфах, был самым низким — 0,02—0,03 кг/сек (скв. 6, 7, 12, 18). Водоприток в эти скважины происходит по порам и мелким трещинам в толще псефитовых туфов. Незначительные изменения по площади мощности водовмещающих пород не сказываются на производительности пароводяных скважин.

Скважины, совершенные и несовершенные по степени вскрытия водоносного комплекса, дают различные дебиты только в зависимости от характера водопритока (табл. 6). Показательна в этом отношении скв. 4, которая вскрыла крупные трещины в призабойной части ствола. В процессе

ее ликвидации удалось провести гидрогеологическое опробование после изоляции интервала, на котором скважина пересекла трещины (213—275,9 м). Дебит скважины практически во всем диапазоне давлений пара на устье уменьшился почти в 4 раза. Все это также подчеркивает исключительную роль трещиноватости пород в циркуляции термальных вод.

Для водообильности отдельных участков, кроме различной водопроницаемости водоносных отложений, связанной с расположением трещинных зон, большое значение имеют мощность водоупорных пород, степень их раздробленности трещинами и связанное с этим местоположение выходов термальной воды на поверхность.

Водонепроницаемые пепловые туфы и туффиты имеют максимальную мощность на севере и северо-востоке участка до 64—90 м (рис. 7, 8) и представлены наиболее плотными разностями. На южном участке мощность их достигает всего лишь 25—51 м. Скважины, расположенные на южном участке, перехватывают, видимо, лишь часть потока, в значительной степени разгружающегося по трещинам в маломощном водоупоре, и характеризуются низкими дебитами, даже если они вскрывают трещинную зону.

Для примера можно сравнить расходы скв. 16 и 4. Первая, пересекая трещинную зону на южном участке, имела расход 8,4 кг/сек при свободном фонтанировании; вторая, заложенная в такую же зону на северном участке месторождения, оказалась наиболее производительной на Паужетском месторождении с расходом 40 кг/сек пароводяной смеси при свободном фонтанировании. То же относится и к скважинам, не вскрывшим крупные обводненные трещины. Так удельный дебит скв. 8 составил 0,044 кг/сек, по сравнению со скв. 2—0,03 кг/сек (юг участка). Кроме того, скважины, заложенные здесь, характеризовались пульсирующим режимом (2, 12, 17). В этой связи интересно отметить, что там, где относительный верхний водоупор имеет небольшую мощность или отсутствуют пепловые туфы, наблюдаются многочисленные, но очень малодобитные источники, располагающиеся довольно бессистемно (район скв. 5). Сосредоточенные же выходы термальной воды в виде кипящих источников с большим дебитом: Парящий I, Парящий II, Пульсирующие — отмечаются там, где распространены маломощные водоупорные отложения, разбитые крупными трещинами.

Следовательно, высокотермальные подземные воды в пределах разведанного участка Паужетского месторождения циркулируют в порово-трещинном коллекторе, проницаемость которого в большой степени связана с развитием трещин.

### **ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПО ДАННЫМ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОПРОБОВАНИЯ**

Фильтрационные свойства пород, заключающих высокотермальные воды, изучены не в полной мере и только по данным опытных откачек (выпусков пароводяной смеси из скважин). Но так как большинство скважин опробовалось после вскрытия всего предполагаемого интервала водопритока, то полученные данные о проницаемости отложений почти всегда характеризуют всю толщу обводненных псефитовых туфов. Однако даже визуальный осмотр керн показывает, что они неоднородны по своим физическим свойствам, например, плотность их несколько увеличивается к подошве, местами изменяется размер и количество обломков лав в туфах, что, конечно, влияет на фильтрационные свойства породы. Проницаемость образцов псефитовых туфов в лаборатории не определялась.

Коэффициенты проницаемости, определенные по данным пробных выпусков, характеризуют эффективную проницаемость водоносного пласта в целом с учетом пористости пород и их трещиноватости. В приводимой

ниже табл. 7 коэффициенты проницаемости, рассчитанные по данным выпусков скв. 2, 7, 8, не вскрывших крупных трещин, в какой-то мере характеризуют проницаемость собственно псефитовых туфов. Проницаемость отложений, разбитых крупными трещинами (такие породы вскрыты скв. 4, 10 и 11), почти в 10 раз больше проницаемости слаботрещиноватых пород.

Таблица 7

**Коэффициент проницаемости псефитовых туфов по данным откачек**

№ скв.	$K_{II}$ , дарси	Интервал водопритока, для которого рассчитан $K_{II}$	№ скв.	$K_{II}$ , дарси	Интервал водопритока, для которого рассчитан $K_{II}$
2	0,00324	51,2—260	8	0,0056	83—313
4	0,0350	90,1—275,9	10	0,0262	85—319,5
7	0,00248	865,7—219,8	11	0,0137	64,5—331

Но даже проницаемость трещиноватых пород, как следует из приведенных данных, очень мала. Сопоставимая с величинами коэффициента проницаемости, определенными по данным пробных выпусков, является его величина, рассчитанная по суммарной разгрузке высокотермальных вод ( $Q - 8640 \text{ м}^3/\text{сут}$ ), если предположить, что последняя близка к расходу потока высокотермальных вод в границах обводненных псефитовых туфов паужетской свиты. Ширина потока ( $B$ ), взятая по пьезоизогипсе в конце потока и не выходящая за створы, где измерялся вынос хлора, равна 1700 м. Тогда

$$K_{II} = \frac{Q_{\mu}}{Bm\gamma I} = 0,104 \text{ дарси,}$$

где  $m$  — мощность водоносных пород, 200 м;  $I$  — гидравлический уклон, 0,05;  $\mu$  — динамическая вязкость, 0,16 сантипуаз;  $\gamma$  — объемный вес воды, 0,09  $\text{т}/\text{м}^3$ .

**УСЛОВИЯ ДВИЖЕНИЯ И РАЗГРУЗКИ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД**

Высокотермальные подземные воды, приуроченные как к крупным трещинам, сопряженным с тектоническими нарушениями, так и к мелким трещинам и порам в толще псефитовых туфов, характеризуются единой пьезометрической поверхностью и образуют гидравлически единый водоносный комплекс (рис. 14).

Абсолютные отметки статических уровней в скважинах, заложенных в толщу туфов, закономерно изменяются на разведанном участке в соответствии с рельефом. Они уменьшаются к долине Паужетки и по ее падению. Статические уровни в скважинах, имеющих приблизительно одинаковые гипсометрические отметки устьев и располагающихся на одинаковых элементах рельефа, устанавливаются почти на равных абсолютных высотах в целом независимо от степени трещиноватости водоносных пород.

Статический уровень в скважинах, расположенных на низких террасах Паужетки, на 10—25 м превышает поверхность земли, за исключением скв. 3, заложенной за пределами термального потока, и скв. 6. В скважинах, пройденных на правой высокой террасе Паужетки, статические уровни установились ниже устья (табл. 8).

По данным измерения статического уровня, в скважинах построена карта пьезометрической поверхности водоносного комплекса паужетской свиты (рис. 14). При этом были использованы прямые замеры

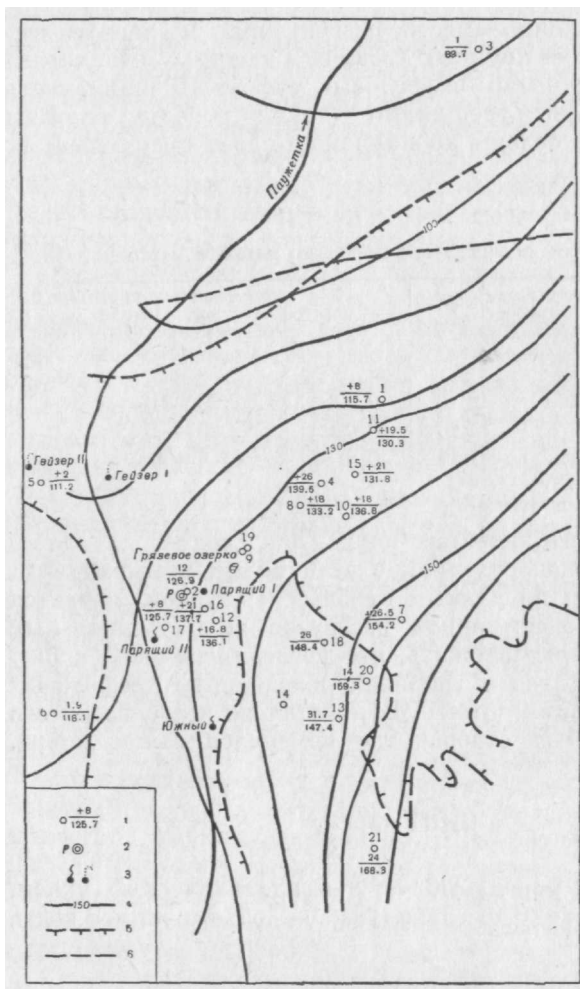


Рис. 14. Карта пьезоизогипс водоносного комплекса Паужетской свиты

1 — разведочная колонковая скважина: цифры слева — номер скважины, цифры справа: в числителе статические уровни относительно устья, в знаменателе — абсолютная отметка статического уровня; 2 — роторная скважина; 3 — кипящие источники и гейзеры; 4 — пьезоизогипсы; 5 — граница зоны самоизливающихся скважин; 6 — северная граница распространения термальных вод с температурой 100° С

Долина Паужетки является естественной дренажной по отношению к водоносному комплексу. Это доказывается, кроме выходов термальной воды здесь, падением отметок пьезометров в скважинах к долине реки, выполаживанием (вогнутостью) пьезометрической поверхности на участке долины. Интенсивная разгрузка термальных вод происходит в южной части долины на разведанном участке месторождения, где наблюдаются многочисленные кипящие источники, гейзеры, паровые струи.

Направление движения термальных вод четко вырисовывается также на карте геозотерм и геолого-гидрогеологических профилей по положению изотерм в вертикальном разрезе (см. рис. 7, 8, 13). Температура в скважинах в интервале водоносного комплекса уменьшается в северо-западном и западном направлениях, причем в роторной скважине установлено

статических уровней, определенные по статическому давлению или путем непосредственного измерения установившегося уровня воды хлопущей, так как температура воды, вскрываемой скважинами, а следовательно, и объемный вес ее были приблизительно одинаковы. Сравнение статических уровней и построение карты пьезогипс на большой территории с распространением термальных и холодных подземных вод, характеризующейся различными объемными весами, очевидно, должно производиться по приведенным давлениям и приведенным уровням. Расчет приведенных давлений по скважинам Паужетского месторождения представляет известные трудности в связи с тем, что нельзя точно определить мощность интервала водопритока. Кроме того, отсутствие глубинных манометров не позволило определять пластовое давление.

Движение воды, как следует из положения пьезоизогипс, происходит с юго-востока на запад северо-запад, к долине Паужетки и затем на север по направлению падения долины (рис. 15). Гидравлический уклон, определенный по расстоянию между пьезоизогипсами, равен 0,05.

## Показатели водоносности псефитовых туфов паужетской свиты

№ скв. глубина, м	Глубина залегания водоносного ком- плекса, м	Мощность водо- носного комплек- са, м	Статический уро- вень воды относи- тельно устья абсо- лютной отметки ста- тического уровня	Удельный дебит, кг/сек м	Температура на от- метке статического уровня, °С*	Температура на верхней и нижней границе водоносно- го комплекса, °С	Примечание
$\frac{1}{237,5}$	86,6	150,9**	$\frac{+8,0}{115,7}$	—	—	—	
$\frac{2}{271}$	51,2	208,8**	$\frac{+12}{126,9}$	0,03	—	—	
$\frac{4}{275,9}$	90,1	185,8**	$\frac{+26,0}{133,5}$	0,25	—	167,5— 169	Водоприток преимущест- венно по крупным трещинам в интервале 210—275,9 м
$\frac{5}{375}$	25,0	202,0	$\frac{+2,0}{111,24}$	0,058	59	131—139	
$\frac{6}{468,49}$	52,0	196,6	$\frac{1,9}{118,1}$	—	22	128—154	
$\frac{7}{219,8}$	65,7	154,1**	$\frac{+26,5}{154,2}$	0,02	119	177—193	Водоприток преимущест- венно в интервале 197—219,8 м
$\frac{8}{351,2}$	83,0	230,0	$\frac{+18,0}{133,15}$	0,044	66	168—176	
$\frac{10}{357,4}$	85,0	234,5	$\frac{+18,0}{136,8}$	0,33	42	152—179	Водоприток преимущест- венно в интервале 100—216 м
$\frac{11}{352,9}$	64,5	266,5	$\frac{+19,5}{180,3}$	0,15	14	141—164	Водоприток преимущест- венно в интервале 89—204 м, предположительно вскрыта трещинная зона на глубине 89 м
$\frac{12}{305,69}$	43	246,2	$\frac{+16,8}{136,1}$	0,06	161	171—192	
$\frac{13}{488,73}$	90,0	259,8	$\frac{31,7}{147,3}$	—	169	174—199	Водоприток преимущест- венно в интервале 100—170 м
$\frac{14}{341}$	61,5	271,0	На устье пар	—	164	173—195	Трещинная зона вскрыта на глубине 316—331,5 м
$\frac{15}{338,8}$	86,7	241,3	$\frac{+21,0}{131,8}$	0,23	109	122—172	Водоприток преимущест- венно в интервале 100—224 м
$\frac{16}{407}$	45,6	224,4	$\frac{+21,0}{137,6}$	—	165	168—190	Водоприток преимущест- венно в интервале 100—190 м. Трещинная зона вскрыта на глубине 176—178 м
$\frac{17}{355,6}$	51	210,1	$\frac{+8}{125,7}$	—	109	158—192	
$\frac{18}{423,6}$	90,5	246,9	$\frac{2,6}{148,4}$	—	42	175—196	
$\frac{19}{350,68}$	86,0	203,0	На устье пар	—	130	146—146, 167	Водоприток преимущест- венно по трещинной зоне в пеплово-пемзовых туфах на глубине 26—35, а также 71,5— 200 м

№ скв. глубина, м	Глубина залегания водоносного ком- плекса, м	Мощность водо- носного комплек- са, м	Статический уро- вень воды относитель- но устья абсолютной отметки статического уровня	Удельный дебит, кг/сек м	Температура на от- метке статического уровня, °С *	Температура на верхней и нижней границе водоносно- го комплекса, °С	Примечание
20 446,1	116,2	237,4	14 159,3	—	147	147—1975	Водоприток преимущественно в интервале по трещинной зоне на глубине в 86,6—107 м и в интервале 185—251 м
21 443,67	145,1	217,3	24 168,3	—	176	178,5— 188,5	Водоприток преимущественно в интервале 80—108 м

\* Температура на отметке статического уровня для самоизливающихся скважин дана по измерению ее на устье. Она во всех случаях была больше температуры в естественных условиях.

\*\* Вскрытая мощность водоносных отложений.

снижение температуры с глубиной. Данные термометрии в скважинах, с одной стороны, подтверждают направление потока, которое определено по положению пьезометрической поверхности; с другой стороны, уточняют направление движения и ширину потока наиболее нагретых вод. Этот поток ограничивается скв. 13, 14, 17, 19, 18, 7. Ширина его, видимо, опре-

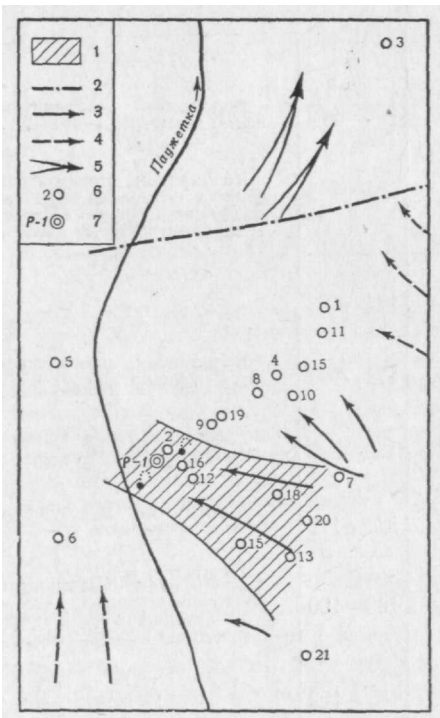


Рис. 15. Схема движения термальных и охлажденных вод на разведываемом участке месторождения

1 — поток наиболее нагретых термальных вод с высоким содержанием хлора, калия и кремнекислоты, движущийся к зоне интенсивной разгрузки; 2 — северная граница распространения высокотемпературных вод с температурой более 100° С; 3 — направление движения высокотермальных вод; 4 — направление движения холодных пресных вод; 5 — движение потока после смешения холодных пресных вод и перегретых минерализованных вод; 6 — разведочные скважины; 7 — P-1 — роторная скважина

деляется небольшой зоной активной разгрузки в долине Паужетки. По геоизотермам на геолого-гидрогеологическом профиле четко выделяется зона повышенных температур в приповерхностной части, совпадающая с участком выходов термальных вод особенно в пределах основной термаль-

ной линии. Изотермы здесь в толще псефитовых туфов смещаются вверх (район заложения скв. 16 и Р-1). Такое же повышение температуры в приповерхностной зоне отмечается по данным измерения температур в скв. 14, заложенной на участке выхода паровых струй в пределах Верхнего термального поля.

Скрытая разгрузка термальных вод, видимо, осуществляется и на северном участке долины Паужетки, как показывает положение пьезоизогипс, в значительно меньшей степени, чем на южном участке. Имея преимущество, по сравнению с холодными или менее нагретыми водами

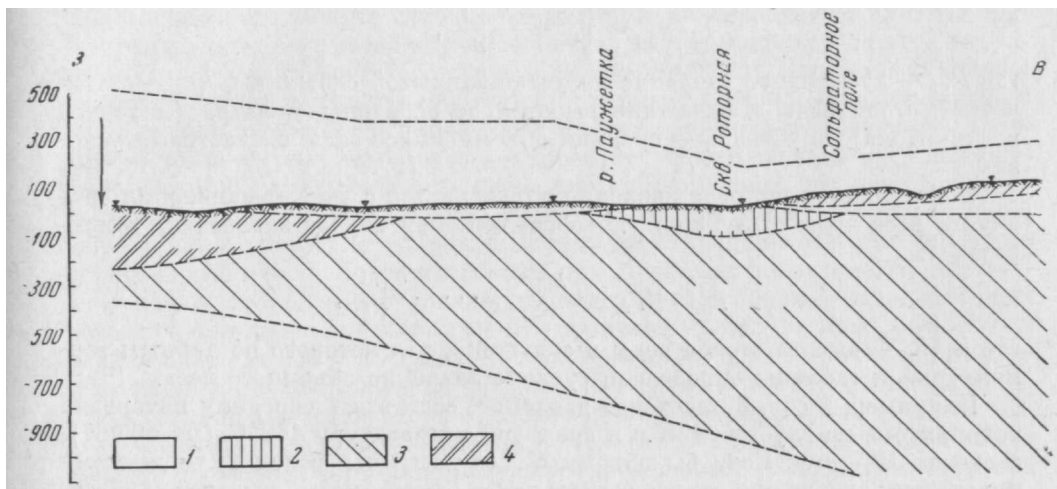


Рис. 16. Геоэлектрический разрез через долину р. Паужетки, по Г. П. Декину. Низкие сопротивления характеризуют зону циркуляции высокотермальных вод

Горизонты с сопротивлением: 1—1,2 омм, 2 — 3 омм, 3 — 10—15 омм, 4 — 75—85 омм.

в фильтрации по порам и трещинам, термальные воды здесь препятствуют разгрузке холодных или менее нагретых иод и сохраняют высокую температуру (рис. 16). На севере участка месторождения, несмотря на лучшие фильтрационные свойства водоносных отложений, приток термальных вод с высокой температурой незначителен, так как связан с трудностью разгрузки их через водоупорные отложения.

Уменьшение температур в зоне водовмещающих пород за пределами потока наиболее нагретых вод объясняется разбавлением их холодными пресными водами, которые, окружая поток высокотермальных вод, создают с ним единую гидродинамическую систему. Это доказывает скв. 3, пробуренной за северной границей месторождения, которая вскрыла слабо минерализованную воду с низкой температурой ( $74^{\circ}\text{C}$  на абс. отм.— 221 м).

ВОДОНОСНЫЙ комплекс паужетской свиты гидравлически связан с нижележащим палеоген-неогеновым водоносным комплексом. Подток термальных вод из последнего четко зафиксирован в период опытной эксплуатации по изменению химического состава и уменьшению теплосодержания пароводяной смеси в скв. 4 и 11, заложённых в толщу псефитовых туфов. Когда в скв. 4 была изолирована трещинная зона в призабойной части ствола, уходящая, видимо, к песчаникам анавгайской серии, увеличились теплосодержание пароводяной смеси и содержание хлора в воде. Концентрация хлора достигла величины 1600 мг/л, что характерно для высокотермальных вод толщ псефитовых туфов.

Очевидно, разгрузка термальных вод нижнего водоносного комплекса в долине Паужетки происходит в проницаемые псефитовые туфы, что пред-

полагалось ранее только по значительному превышению пьезометрического уровня этих вод относительно пьезометрической поверхности водоносного комплекса паужетской свиты.

Значительное превышение статического уровня над поверхностью земли в скважинах в пределах потока высокотермальных вод, обуславливающее интенсивную разгрузку в зоне дренирования, связано не только с пластовым давлением, но и с тем, что пластовое давление уравнивается большей высотой столба нагретой воды, с объемным весом меньше единицы. Это подтверждается формулой расчета пластового давления.

$$P_{пл} = P_{ст} + \frac{h_{ст} \gamma}{10},$$

где  $P_{ст}$  — избыточное давление на устье закрытой скважины,  $h_{ст}$  — статический столб воды в скважине высотой от середины фильтра (интервал водопритока) до устья,  $\gamma$  — средний объемный вес воды в пластовых условиях.

Более точно пластовое давление определяется с учетом изменения объемного веса воды с глубиной, который в нашем случае зависит от температуры:

$$P_{пл} = P_{ст} + \frac{h_1 \gamma_1}{10} + \dots + \frac{h_n \gamma_n}{10},$$

где  $h_1, h_n$  — высота столба воды в скважине, для которого по данным термометрии и таблицы определено среднее значение объемного веса.

Например, в скв. 8 пластовое давление, если взять середину интервала водопритока на глубине 198 м и среднюю температуру 160° С ( $\gamma = 0,907$ ), составит 19,7 атм. Если бы объемный вес воды был равен 1, то данному пластовому давлению соответствовал бы столб воды высотой 197 м, и статический уровень не доходил до дневной поверхности на 1 м (198 — 197 = 1). В действительности же статический уровень располагается на 18 м (выше поверхности земли).

Кроме того, что высокая температура термальных вод способствует их выходу на поверхность, она обуславливает активную циркуляцию в пределах всей гидротермальной системы. По сравнению с холодными высокотермальные воды имеют значительное преимущество в скорости фильтрации. Так, при температуре 160—180° в интервале обводненных пород коэффициент динамической вязкости воды составляет 0,16 сантипуаз против 1,33 сантипуаз при 10°. При прочих равных условиях это увеличивает скорость фильтрации термальных вод в 6—7 раз в соответствии с формулой

$$V = K_n \frac{\gamma}{\mu} J,$$

где  $V$  — скорость фильтрации,  $\gamma$  — объемный вес воды,  $\mu$  — динамическая вязкость воды,  $K_n$  — коэффициент проницаемости,  $J$  — гидравлический уклон.

Выше указывалось, что проницаемость водовмещающих пород на Паужетском месторождении очень низка. Циркуляция холодных подземных вод по ним исключительно затруднена, что подтверждается отсутствием крупных холодных источников из этой толщи. Однако, будучи практически непроницаемыми для холодных вод, эти породы оказываются относительно хорошо проницаемыми для вод с высокой температурой. Не будет преувеличением сказать, что своим существованием активная гидротермальная система обязана теплу в первую очередь.

Влияние высоких температур на динамику гидротерм ярко проявляется в верхней зоне очагов разгрузки, при выходе гидротерм на поверхность. В этих условиях в связи со снижением внешнего давления происходит вскипание воды и парообразование. Гидравлический эффект этого явления, получивший название парлифта, заключается в том, что глубоко про-

никающее парообразование резко снижает давление в канале источника или в стволе скважины. В результате поступление термальной воды из водовмещающих пород происходит под действием очень большого перепада давлений, отвечающего условиям откачки с понижением уровня до ста и более метров. На пароводяных источниках и скважинах идет непрерывная самопроизвольная откачка воды паром, чем, в частности, и объясняется их, как правило, большой дебит.

В районе Паужетской термальной площади, в активном очаге разгрузки, нижняя граница зоны парообразования в естественных условиях располагается в среднем на глубине около 120 м. Это следует из анализа термограммы роторной скважины и сопоставления температур на этой глубине с теплосодержанием пароводяной смеси источника Парящий I. Однако действительная картина значительно сложнее. Глубина парообразования находится в сложной зависимости от многих параметров, из которых главные — температура гидротерм и гидростатическое давление. С повышением температуры растет упругость насыщенного пара, что дает воде возможность вскипать на большей глубине. С другой стороны, глубина парообразования зависит от гидравлических сопротивлений по пути движения пароводяной смеси. Опытные работы на скважинах показали, что на Паужетском месторождении вскипание гидротерм в хорошо разработанных каналах и крупных трещинах может происходить значительно ниже 120 м и проникать до 200 м и глубже. В то же время по порам и мелким трещинкам процесс парообразования происходит очень неглубоко и лишь в непосредственной близости от поверхности земли или канала источника. Таким образом, зона парообразования в очагах разгрузки гидротерм имеет весьма сложные очертания, которые определяются в основном системой трещиноватости и степенью (разработанности каналов движения).

### **Причины и условия возникновения гейзерного режима**

В заключении настоящего раздела, посвященного условиям циркуляции высокотермальных вод, целесообразно остановиться на вопросе, который, судя по литературным данным последних лет, все еще остается дискуссионным. Речь идет о режиме гейзеров, представляющих собой одно из самых своеобразных и ярких явлений природы. На Паужетке, как уже отмечалось, известны только два природных гейзера; они очень малы и не могут идти ни в какое сравнение с гигантами, бьющими в «Долине гейзеров» на Камчатке, Йеллоустонском парке, Новой Зеландии и Исландии. Однако на Паужетском месторождении имелся целый ряд разведочных скважин, которые характеризовались гейзерным и пульсирующим режимом извержения пароводяной смеси, и масштабы их деятельности не уступали самым мощным природным гейзерам.

Исследования, проведенные на этих скважинах, дали ценный материал, позволяющий правильно интерпретировать причины гейзерного режима и одновременно отказаться от некоторых устаревших положений.

При гейзерном режиме извержение пароводяной смеси происходит периодически, причем каждое извержение — это цикл из нескольких стадий. В наиболее типичном случае извержение начинается с излива воды, сначала немного охлажденной, потом все более и более горячей (рис. 17). Поведение гейзера в эту стадию по существу ничем не отличается от действия обычных, некипящих источников. Расход воды в стадию излива очень незначителен. По прошествии некоторого времени равномерность в изливе нарушается. Из грифона гейзера начинаются отдельные выплески воды, в перерыве между которыми излив прекращается. Иногда можно видеть, что выплески воды сопровождаются выделением большого парового пузыря, что говорит о начинающемся в канале гейзера вскипании. Постепенно частота выплесков усиливается и, наконец, наступает такой момент, когда

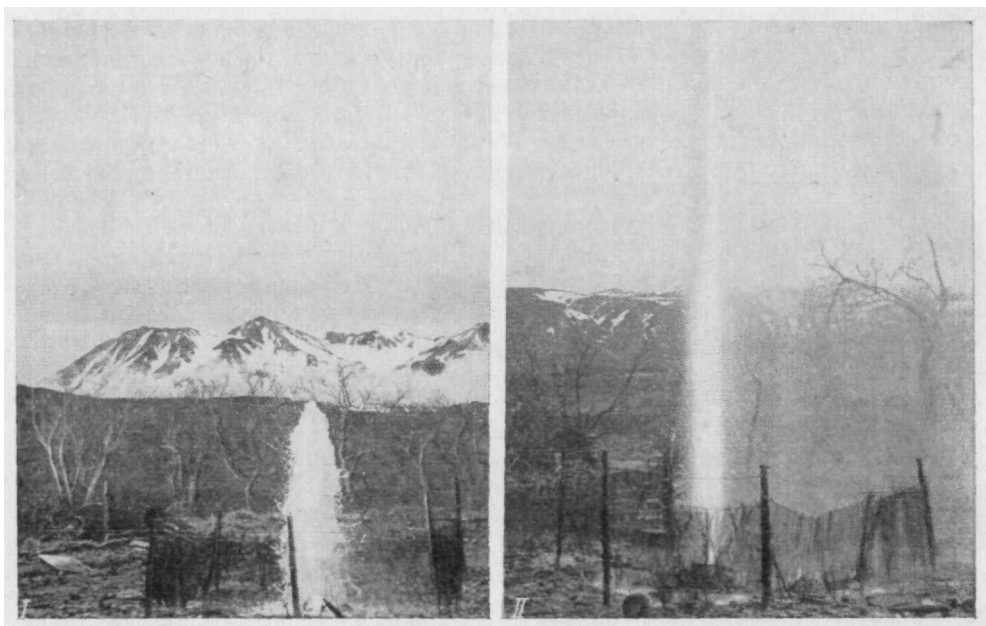


Рис. 17. Гейзерный режим извержения пароводяной смеси  
 I — начальная стадия (излив воды); II — заключительная стадия извержения  
 Фото М. П. Флоренского

очередной выплеск перерастает в мощный выброс. Он начинается с выталкивания большой водяной пробки, вслед за которой вырывается пароводяная смесь. Этот момент знаменует собой начало стадии фонтанирования, развивающейся очень бурно и эффектно. Струи воды и клубы пара из больших природных гейзеров, а также из скважин взлетают вверх на несколько десятков метров. Временные значения расходов при фонтанировании выражаются десятками литров в секунду. Именно эта стадия и представляет по существу само извержение. Оно может длиться более или менее продолжительное время, но затухает обычно в весьма короткий срок. После этого наступает стадия парения, постепенно уменьшающегося, и в конечном счете гейзер прекращает свою видимую деятельность. Однако в перерыве между прекращением парения и началом излива происходит заполнение канала гейзера или ствола скважины водой, которое также можно выделить в отдельную стадию (рис. 17, 18).

Таким образом, гейзеры представляют собой разновидность пароводяных, кипящих источников. Обязательным условием существования гейзеров является питание их термальными водами с температурой значительно выше  $100^{\circ}$ . Только в таком случае вода при своем приближении к поверхности может вскипать, а упругость пара будет достаточной для преодоления давления  $\gamma$  выброса водяного столба в несколько десятков метров.

В то же время исследования на скважинах с пульсирующим и гейзерным режимом показали, что развитие извержения сопровождается существенными изменениями в величине паросодержания и энтальпии пароводяной смеси.

Наиболее резко в этом отношении отличаются друг от друга две крайние стадии цикла: стадия излива, в которой паросодержание равно нулю, и стадия парения, когда из скважины выходит только один пар. Между этими двумя крайними состояниями располагается стадия фонтанирования, при которой отмечается систематический рост паросодержания, достигающий максимума в конце стадии перед вступлением скважины

**Расход и теплосодержание пароводяной смеси  
на пульсирующей скважине К-2 (по данным 18 замеров)**

Стадии цикла извержения	Средняя продолжительность стадий, мин	Расход пароводяной смеси, кг/сек			Энтальпия пароводяной смеси, ккал/кг			Суммарный вынос пароводяной смеси, кг	Суммарный вынос тепла, ккал	Среднее теплосодержание пароводяной смеси за цикл	
		от	до	ср.	от	до	ср.				
Начальная	3			7,2			138	21,6	2981		
Средняя {	1 половина	9,5	3,3	3,7	3,55	161	183	170	33,7	5733	173,5
		2 половина	30	2,0	3,4	2,7	168	259	191	81,0	
Конечная	15	2,1	3,1	2,5	140	163	160	37,5	6000		
Итого . . .								173,8	30 185		

в стадию парения. Что же касается средней величины энтальпии пароводяной смеси, рассчитанной за весь цикл (табл. 9), то она не отличается от энтальпии, замеренной на той же скважине при постоянном режиме и характерной для данного водоносного комплекса. То же относится и к при-

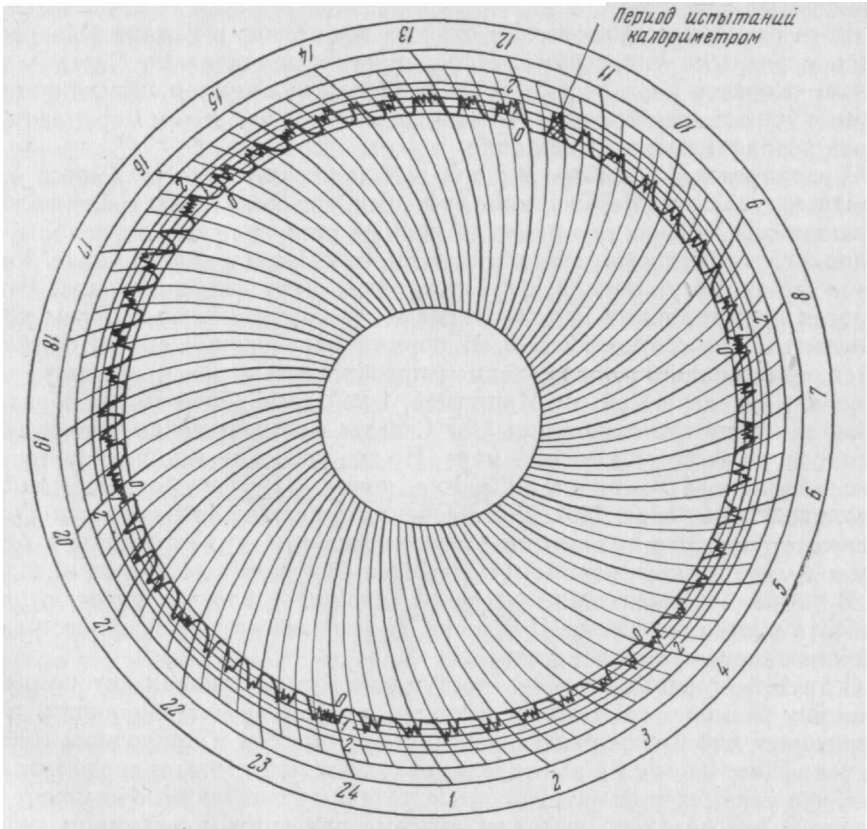


Рис. 18. Диаграмма давления пара на устье скважины К-1, обладающей гейзерным режимом  
Режим прерывистый, прибор МГ-410, поставлено 20.IX 1959 г., снято 21.IX 1959 г.

родным гейзерам. Средняя энтальпия пароводяной смеси гейзеров имеет в общем такое же значение, как и на непрерывно действующих пароводяных источниках.

Следовательно, существование гейзеров никоим образом не связано с какими-то особыми, исключительными условиями их питания, например, как это иногда думают, с прорывами «глубинного» перегретого пара. В питании гейзеров участвует тот же самый водоносный комплекс, на котором базируются непрерывно действующие пароводяные источники и скважины. Процессы, приводящие к возникновению гейзерного режима, развиваются в стволе скважины или, если иметь в виду естественные источники, в их канале и связанных с ним трещинах.

В отличие от непрерывно действующих пароводяных источников, образовавшийся в канале гейзера пар в своем движении намного опережает породившую его воду. Этот эффект опережающего движения паровой фазы в канале источника или стволе скважины, как правильно отметил А. С. Нехорошев (1959), — ведущий в формировании гейзерного режима. В результате чего отставшая от пара вода не успевает в ходе извержения достигнуть устья скважины и присоединиться к первым порциям пароводяной смеси, вытолкнутой паром. Она остается на некоторой глубине в стволе скважины и продолжает еще некоторое время весьма интенсивно кипеть, выделяя пар в стадию парения. Но постепенно температура ее в результате кипения снижается до  $100^{\circ}\text{C}$ , и парение в конце концов прекращается. Новый цикл извержения начинается лишь тогда, когда депарированная и остывшая вода достигнет устья и сольется, дав место свежим, высокотемпературным порциям.

Из-за различных физических свойств вода и пар в канале гейзера движутся с разными скоростями. Пар движется значительно быстрее воды. Однако скорость пара весьма существенно регулируется как гидравлическими сопротивлениями по пути его следования, так и тем перепадом давления, которым вызвано движение.

С увеличением диаметра канала для движения пара создаются благоприятные условия. Не случайно поэтому грифоны всех гейзеров представляют собой более или менее обширные резервуары, а их каналы, уходящие в глубину, достигают иногда в ширину метра и даже больше. Уменьшение же диаметра канала, наоборот, затрудняет движение пара. Что же касается воды, то она в канале испытывает по сравнению с паром крайне незначительные сопротивления. В порции пароводяной смеси, образовавшейся при вскипании, вода, хотя и преобладает по весу, занимает очень небольшой удельный объем. Например, 1 кг пароводяной смеси, образовавшейся в результате вскипания  $200^{\circ}\text{C}$  воды и находящейся при давлении 3 *ата*, содержит всего 11 вес.% пара. Но это небольшое по весу количество пара занимает объем около 80 л, т. е. почти в 100 раз больше, чем вода. Ясно, что уменьшение проходного сечения в первую очередь ограничивает движение пара. Это положение доказывается тем, что скважины с гейзерным и пульсирующим режимом поддаются регулировке с помощью задвижки. В частности, уменьшив проходное сечение, удалось полностью ликвидировать пульсации на скв. К-2, а скв. К-1 перевести из гейзерного режима в режим непрерывного действия.

С другой стороны, скорость поступления воды в канал источника или скважину зависит от фильтрационных свойств водовмещающих пород. Характерно, что и скважины с гейзерным режимом и природные гейзеры, как бы эффективно они не выглядели, обладают небольшими средними дебитами, что указывает на затрудненные условия их питания. Это может быть связано с относительно высоким гипсометрическим положением гейзера. Еще Т. И. Устинова, впервые описавшая «Долину гейзеров» на Камчатке, отметила, что гейзеры там располагаются в среднем на значительно более высоких уровнях по сравнению с непрерывно кипящими источниками. По-

следние тяготеют к уровню реки и «перехватывают» большую часть разгружающейся высокотермальной воды.

Таким образом, причины гейзерного режима кроются в несоответствии между возможностями питания гейзера и несоизмерно большим диаметром выводящего канала. В природных условиях такого рода несоответствие встречается не так уж часто. Обычно для пароводяных источников характерно установившееся само собой равновесие между притоком воды в канал и извержением из него пароводяной смеси, что обуславливает непрерывность и равномерность их работы. Но даже на тех термальных площадках, где имеются мощные и многочисленные гейзеры, например в «Долине гейзеров» на Камчатке, основная масса термальной воды поставляется не ими, а непрерывно действующими источниками.

Продолжительность рабочих циклов и их частота, а также длительность отдельных стадий при гейзерном режиме зависит от конкретной гидрогеологической обстановки и конструкции скважины. Частота извержений разных источников и скважин варьирует в очень широком диапазоне. На Паужетском месторождении, например, наблюдались, с одной стороны, скважины, которые фонтанировали по 5—7 мин примерно 3 раза в час, и с другой — скважины с получасовой продолжительностью фонтанирования, возобновлявшегося каждые 6 часов. Еще более резкая разница наблюдается между деятельностью двух небольших природных гейзеров на Паужетке. В одном из них полный цикл деятельности уместается в 1 минуту, в другом же — периоды покоя измеряются 20-ю часами, а иногда и более.

Особенности гидрогеологической обстановки могут нарушать типичный гейзерный режим. На некоторых природных гейзерах практически отсутствует стадия парения, следующая за фонтанированием, так как заливающаяся в канал гейзера охлажденная вода прекращает кипение. Иногда не наблюдается стадия излива, что характерно для скважин и источников, где статический уровень термальной воды располагается ниже поверхности земли. Хотя в этих случаях уровень термальной воды и устанавливается неподвижно на некоторой глубине, движение в канале все же происходит. Этому способствует либо поглощение воды в верхних безнапорных горизонтах, либо интенсивная вертикальная конвекция, которая в конечном счете может стимулировать вскипание воды и начало фонтанирования.

Пульсирующий режим принципиально сходен с гейзерным. В нем также отчетливо выделяются отдельные циклы, во время которых отмечается рост паросодержания и интенсивности извержения. Однако при пульсирующем режиме в извержении не наступает перерыва, так как к концу очередного цикла (в ствол скважины на уровень вскипания успевают поступить высокотемпературные порции воды, ранее не захваченные кипением).

Формирование гейзерного режима происходит в основном в приповерхностной зоне и, во всяком случае, не выходит из того водовмещающего комплекса, который дренируется в очаге разгрузки гидротерм. Это обстоятельство не позволяет считать гейзеры, как это нередко делается, исключительными индикаторами состояния гидротермальной системы. По изменению в их режиме нельзя судить о состоянии всей системы в целом. В частности, «затухание» гейзеров, переход их в непрерывно кипящие источники, никоим образом не свидетельствует о «затухании» или ослаблении всей гидротермальной деятельности. Для суждения о состоянии последней и ее изменении необходимы режимные наблюдения за всей массой воды, выходящей в очаге разгрузки, и за всей суммой тепла, которое ею выносится.