

## ТРАНСПОРТИРОВКА ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ С ЧАСТИЧНЫМ УДАЛЕНИЕМ ВОДЫ НА МУТНОВСКОМ ГЕОТЕРМАЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

### АННОТАЦИЯ

Опыт эксплуатации систем транспортировки пароводяного теплоносителя на Мутновском геотермальном месторождении привел к идее использования частичного удаления воды вблизи устья скважины с целью повышения устойчивости режима транспортировки и увеличения расхода пара, поставляемого на ГеоЭС. В настоящей работе выполнен анализ эффективности указанного мероприятия. Установлено, что частичное удаление воды непосредственно не снижает риск возникновения пульсаций, а возможность увеличения расхода поставляемого пара зависит от графика производительности конкретной скважины. На примере скважины 042 Мутновского месторождения установлено увеличение расхода пара. Отмечено, что увеличение расхода способствует повышению устойчивости режима транспортировки смеси.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Использование глубинного тепла Земли, ввиду огромного запаса ресурсов, рассматривается как одно из перспективных направлений энергетики. Актуальными являются работы, связанные с совершенствованием технологий добычи, транспортировки и утилизации геотермальных теплоносителей, чему способствует усиление экологических требований и освоение новых месторождений со специфическими характеристиками теплоносителей.

Наибольшие перспективы в области прикладной геотермии связаны с освоением месторождений парогидротерм, теплоноситель которых представлен смесью пара и воды [1]. Известно [2], что на подобных месторождениях при необходимости транспортировки не только пара, но и воды, а это диктуется необходимостью более глубокого использования потенциала теплоносителя и требованиями экологического характера, особую привлекательность приобретает транспортировка теплоносителя в виде смеси воды и пара. Поэтому в последнее время в практике освоения геотермальных месторождений все чаще прибегают к транспортировке пароводяной смеси от скважин к ГеоЭС [3 – 7].

Наряду с очевидными достоинствами транспортировка пароводяной смеси имеет свои сложности. С одной стороны, для снижения уровня пульсаций в потоке, оказывающих негативное влияние на трубопровод и сопряженное с ним оборудование, требуется поддержание высоких скоростей. С другой стороны, высокие скорости приводят к большим гидравлическим сопротивлениям, что влечет за собой снижение расхода добываемого из скважин теплоносителя.

В практике освоения Мутновского месторождения парогидротерм для ликвидации пульсаций и

увеличения расхода теплоносителя делались попытки использовать частичное удаление воды (подсушка смеси), повышающее паросодержание и энтальпию транспортируемой смеси. Однако данные попытки, выполненные без необходимой научной проработки, имели или явно негативный, или сомнительный результат. В настоящей работе исследуется влияние частичного удаления воды на пульсации и расход подаваемого на станцию теплоносителя и осуществляется оценка эффективности данного мероприятия при транспортировке теплоносителя от скважины 042 Мутновского геотермального месторождения.

### 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Основы методов гидравлического расчета включают в себя рекомендации по выбору диаметра труб для обеспечения беспульсационного режима работы трубопровода и рекомендации по расчету перепада давления. Для выбора диаметра труб рекомендуется условие, предложенное М.А. Готовским и Е.Н. Гольдбергом по результатам обобщения опытных данных на стенде «Камчатскэнерго» [8]:

$$D \leq 0,252 \left( \frac{4G_{\text{см}}}{\pi \rho_{\text{см}}} \right)^{0,4}, \quad (1)$$

Условие (1) можно рассматривать как требование к поддержанию высоких скоростей транспортировки. Кроме того существуют требования к фазовому составу теплоносителя – паросодержание должно соответствовать условию [1]:

$$x > \frac{1}{1 + 1,6 \sqrt{\frac{\rho'}{\rho''}}}, \quad (2)$$

Гидравлический расчет основывается на выражении перепада давления

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_g + \Delta p_{\text{уск}} + \Delta p_{\Sigma\text{м}}, \quad (3)$$

Для определения перепада давления на трение рекомендуется формула [1]

$$\Delta p_{\text{тр}} = \frac{0,02 \rho_{\text{см}} (v_{\text{см}} - v'_c)^2 L}{2D}, \quad (4)$$

где  $v'_c$  – максимальная скорость жидкой фазы, определяемая в соответствии с линией насыщения по формуле [1]

$$v'_c = \left( \frac{dp'}{dp} + \frac{(\rho' - \rho'') \rho'}{\rho'' r} \left( \frac{dh'}{dp} - \frac{1}{\rho'} \right) \right)^{-0,5}, \quad (5)$$

Формула (4) соответствует упрощенному расчету [1] и при ее использовании рекомендуется пренебречь перепадом давления на ускорение. Отме-

тим, что следование рекомендациям по выбору диаметра труб фактически приводит к работе в достаточно узком диапазоне скоростей, а ускорение играет значительную роль только при приближении к критическим скоростям, лежащим за пределом данного диапазона.

Гравитационный перепад давления рассчитывается по формуле

$$\Delta p_g = \rho_{см} g H, \quad (6)$$

По результатам опытных исследований на стенде «Камчатскэнерго» для расчета перепада давления на местных сопротивлениях при течении пароводяной геотермальной смеси М.А. Готовским рекомендована гомогенная модель потока, при этом коэффициент местного сопротивления двухфазного потока рекомендовано считать в 1,4 раза больше принятого для данного сопротивления коэффициента при однофазном течении [8]. С учетом этого для расчета перепада давления на местном сопротивлении в пароводяном потоке имеем:

$$\Delta p_m = \frac{1,4 \zeta \rho_{см} v_{см}^2}{2}, \quad (7)$$

Суммарный перепад давления на местных сопротивлениях в уравнении (3) находится как сумма перепадов на всех местных сопротивлениях, имеющихся на рассматриваемом участке трубопровода.

Особенностью расчета коротких трубопроводов (до 100 м) является возможность принятия положения о незначительном изменении параметров смеси, что позволяет рассчитывать перепады давления в уравнении (3), используя параметры смеси в одной точке. Кроме того, гравитационный перепад давления является незначительным и им можно пренебречь. Более длинные трубопроводы следует разбивать на несколько участков, в пределах которых параметры смеси изменяются незначительно, и расчет производить последовательно, принимая конечное давление на предыдущем участке за исходное на текущем. При этом гравитационный перепад давления, являясь незначительным на отдельном участке, для трубопровода в целом может достигать существенных значений [9]. Поэтому для исключения возможной систематической погрешности расчета на каждом интервале при перепаде высот по трассе более 10 м рекомендуется учитывать гравитационный перепад.

### 3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДА

В качестве характеристик скважины использовались результаты опробования, представленные в таблице 1. Длина трубопровода составляет 1600 м, способ компенсации температурных расширения труб – сильфонный. Коэффициент местных сопротивлений компенсаторов принимался 0,1 на каждые 100 м трубопровода. Другие местные сопротивления и геометрия трассы учитывались согласно проекту трубопровода. Давление в конечной точке трубопровода (вход на станцию) принималось 6,2 бар.

Таблица 1. Исходные данные

Давление на устье, бар	Расход смеси, кг/с	Энтальпия, кДж/кг
5,6	111	1107
7,9	105	1118
10,2	93,8	1143
13,6	77,3	1167
17,2	46,1	1154

Расчет трубопровода осуществлялся графическим методом (по точке пересечения характеристики пропускной способности трубопровода и графика производительности скважины). В результате рекомендованы трубы диаметром 529 мм. Расчетный перепад давления составляет 2,7 бар, расход смеси 100,5 кг/с, давление на устье (абсолютное) 8,9 бар, расход пара на станцию 21,9 кг/с.

Следует отметить, что указанный диаметр труб близок к предельному, т.е. снижение производительности скважины может вызвать пульсации в трубопроводе.

### 4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДСУШКИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ

Идея использования подсушки возникла при разработке Мутновского месторождения в связи с проблемой пульсационного режима работы скважины А2, вызванного ошибками в выборе диаметра труб для транспортировки смеси. Предполагалось, что частичное удаление воды с помощью малогабаритного сепаратора с малым гидравлическим сопротивлением решит указанную проблему. Однако удалось лишь увеличить период работы скважины между остановами, вызванными по всей видимости возвратным течением воды из трубопровода.

Согласно представленным методическим рекомендациям, для нормальной работы трубопровода должны выполняться условия (1) и (2). При этом условие (2) не зависит от диаметра труб и является для практической геотермии достаточно мягким. На рис.1 представлен график зависимости минимального допустимого расходного паросодержания от давления, определяемого условием (2). Так как вопрос о транспортировке пароводяной смеси на геотермальных промыслах ставится обычно в случаях, когда массовое расходное паросодержание значительно больше 0,1 (в том числе и для Мутновского месторождения), из графика видно, что соответствующее условие выполняется и без подсушки.

Условие (1) определяет максимально допустимый диаметр для транспортировки смеси. В случае со скважиной А2 имеет место несоблюдение именно этого условия. Следует заметить, что отношение массового расхода и плотности смеси, стоящее в (1), есть объемный расход смеси. Следовательно, условие (1) можно представить в виде

$$D \leq 0,278 Q_{см}^{0,4}, \quad (8)$$

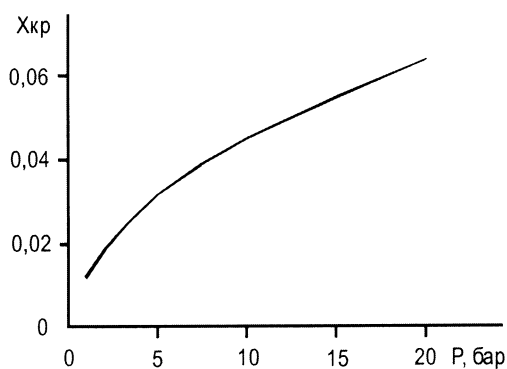


Рис. 1. Зависимость минимально допустимого (критического) массового расходного паросодержания при транспортировке смеси от давления.

Ввиду значительно большей плотности воды объемный расход смеси, даже при значительном содержании воды по массе, определяется объемным расходом пара. Анализ показывает, что для условий Мутновского месторождения доля воды в объемном расходе не превышает 2 %. Более того, подсушка, хоть и незначительно, снижает объемный расход смеси, т.е. согласно (8) снижает максимально допустимый диаметр для транспортировки смеси.

Таким образом можно сделать вывод, что частичное удаление воды само по себе является неэффективным средством для перевода трубопроводов, транспортирующих пароводяную смесь на геотермальных промыслах, из пульсационного режима в нормальный. Однако данное мероприятие может иметь положительный результат опосредованно через снижение перепада давления в трубопроводе, снижение устьевого давления, увеличение массового расхода добываемой смеси и увеличение объемного расхода транспортируемого теплоносителя. Но оценку эффективности такого опосредованного влияния необходимо осуществлять в комплексе с решением другой поставленной задачи – определения изменения расхода скважины при подсушке смеси, что будет рассмотрено в дальнейшем. Следует отметить, что реальным средством предотвращения пульсаций является полное удаление воды, или высокая степень сепарации с отводом конденсата по трассе в местах его возможного скопления.

## 5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДСУШКИ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Идея использования подсушки так же возникла в связи с попыткой увеличить расход добываемого теплоносителя скважины 037 Мутновского месторождения. Трубопровод пароводяной смеси от этой скважины так же был выполнен без необходимого научного обоснования, но в этом случае имело место занижение диаметра трубы. При этом, с учетом большой длины трубопровода (более 2 км), имел место значительный перепад давления (более 4 бар), в связи с чем для транспортировки смеси требовалось эксплуатировать скважину при большом устье-вом давлении. В свою очередь расход добываемого

теплоносителя уменьшается с ростом давления. Поэтому было решено установить вблизи устья скважины малогабаритный линейный сепаратор и транспортировать уже подсушенную смесь, снизив устьевое давление и увеличив расход теплоносителя.

Однако необходимо заметить, что удаление воды вблизи устья скважины происходит при более высоком, по сравнению со стационарными сепараторами, давлении. В результате теряется часть пара, который мог бы выделиться из удаленной воды при снижении давления. А поскольку именно пар используется для выработки электроэнергии на Мутновской ГеоЭС, эффективность подсушки будет зависеть от конкретных характеристик пропускной способности трубопроводов и графиков производительности скважин.

Согласование пропускной способности трубопровода и характеристики производительности скважины осуществлялось графическим методом – зная исходное давление (в конечной точке) по результатам расчета трубопровода строился график зависимости устьевого давления от расхода, и рабочие значения расхода и устьевого давления определялись по точке пересечения данного графика с графиком производительности (рис. 2).

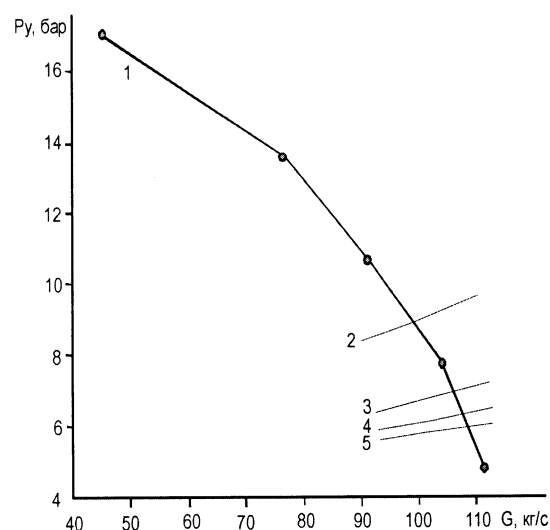


Рис. 2. Согласование характеристик трубопровода и скважины:  $P_y$  – устьевое давление;  $G$  – массовый расход смеси из скважины; 1 – график производительности скважины; 2 – характеристика трубопровода без подсушки; 3 – характеристика трубопровода с подсушкой до 1800 кДж/кг; 4 – характеристика трубопровода с подсушкой до 2200 кДж/кг; 5 – характеристика трубопровода с подсушкой до 2600 кДж/кг.

Расчет пропускной способности трубопровода выполнялся для четырех вариантов: без удаления воды (энтальпия смеси – 1130 кДж/кг), подсушка смеси на устье до энтальпии 1800 кДж/кг, 2200 кДж/кг и 2600 кДж/кг. При этом принималось, что сепарация происходит при устье-вом давлении. А поскольку расход транспортируемой смеси зависит от изначально неизвестного устьевого давления, расчет каждого значения на графике пропускной

способности трубопровода осуществлялся методом последовательных приближений [1]. Для каждого варианта определялся расход пара, подаваемого на станцию, с учетом окончательной сепарации смеси при давлении 6,2 бар. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Данные по вариантам транспортировки

Энтальпия смеси, кДж/кг	Давление на устье, бар	Расход смеси на скважине, кг/с	Расход смеси в трубопроводе, кг/с	Расход пара на станцию, кг/с
1130	8,9	100,5	100,5	21,9
1800	7,3	106,5	41,4	22,4
2200	7,0	107,5	31,0	22,7
2600	6,9	108,0	24,7	22,9

Как видно из таблицы 2, использование подсушки для данной скважины заметно увеличивает расход подаваемого на станцию пара. При этом подсушка до энтальпии 2600 кДж/кг, что соответствует паросодержанию 0.92, увеличивает расход пара на 1,0 кг/с.

Следует также заметить, что частичная сепарация имеет некоторые недостатки, которые даже в случае заметного увеличения расхода пара могут привести к неэффективности ее использования. Во-первых, сепарация вблизи устья требует решения вопроса об утилизации сепарата, что как правило связано с нарушениями экологических требований. Во-вторых, общее увеличение расхода добываемой смеси сопряжено с дополнительными нагрузками как на геотермальный резервуар, так и на оборудование промысла (водоводы сепарата, насосы закачки и т.д.).

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных расчетов для трубопровода пароводяной смеси от скважины 042 рекомендуется труба диаметром 529x10. При этом расчетный перепад давления составит 2,7 бар, расход смеси 100,5 кг/с и расход пара на станцию 21,9 кг/с. Установка линейного сепаратора вблизи устья скважины, снижающего массовое расходное паросодержание до 0,9, снизит перепад давления до 0,7 бар, увеличит расход добываемой смеси до 108,0 кг/с и увеличит расход пара на станцию до 22,9 кг/с. Важно также подчеркнуть, что при подсушке увеличится объемный расход теплоносителя за счет увеличения расхода пара, что благоприятно скажется на устойчивости работы трубопровода.

Следует отметить, что подсушка оказывается неэффективной в случае слабой зависимости расхода скважины от устьевого давления. В частности, аналогичный анализ, проделанный для скважины 037 Мутновского геотермального месторождения, показал, что подсушка смеси не позволяет увеличить расход поставляемого пара.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$D$  – диаметр трубы,  
 $G_{см}$  – массовый расход смеси;  
 $\rho_{см}$  – плотность смеси, определяемая по гомогенной модели;  
 $\rho''$  и  $\rho'$  – плотности пара и воды;  
 $x$  – массовое расходное паросодержание.  
 $\Delta p$  – общий перепад давления;  
 $\Delta p_{тр}$  – перепад давления на трение;  
 $\Delta p_g$  – гравитационный перепад давления;  
 $\Delta p_{уск}$  – перепад давления на ускорение смеси;  
 $\Delta p_{\Sigma}$  – суммарный перепад давления на местных сопротивлениях;  
 $v_{см}$  – скорость смеси по гомогенной модели;  
 $L$  – длина трубопровода;  
 $v'_c$  – максимальная скорость жидкой фазы;  
 $r$  – удельная теплота парообразования;  
 $h'$  – удельная энтальпия воды.  
 $H$  – перепад высот начальной и конечной точек участка;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $\Delta p_m$  – перепад давления на местном сопротивлении;  
 $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления для однофазного потока;  
 $Q_{см}$  – объемный расход смеси.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шулюпин А.Н. Пароводяные течения на геотермальных промыслах. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004. 149 с.
2. Earth sciences. Paris: UNESCO, 1973. N. 12.
3. Lee K.C., Jenks D.G. Ohaaki geothermal steam transmission pipelines // Proceedings, 11-th New Zealand Geothermal Workshop, 1989. P. 25–30.
4. Wigly D.M. Separation plant and pipework design – Ohaaki steam field // Proceedings, 11-th New Zealand Geothermal Workshop, 1989. P. 19–24.
5. Delnov Y., Shulyupin A. Geothermal power generation in Kamchatka, Russia // Geothermal Resources Council Transactions. Portland, 1996. V. 20. P. 733–736.
6. Zhao H.D., Lee K.C., Freeston D.H. Geothermal two-phase flow in horizontal pipes // Proceedings, World Geothermal Congress 2000. Kyushu-Tohoku, 2000. P. 3349–3353.
7. Мутновский геотермальный энергетический комплекс на Камчатке / О.В. Бритвин, О.А. Поваров, Е.Ф. Клочков и др. // Теплоэнергетика. 2001. № 2. С. 4–10.
8. Разработка методики расчета транспорта пароводяной смеси от скважин к ГеоТЭС: Отчет о НИР / НПО ЦКТИ; Руковод. работы М.А. Готовский. Ленинград, 1990.
9. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Гидравлический расчет трубопроводов для транспортировки пароводяной смеси не геотермальных промыслах // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2004. Приложение №4. С. 97–102.