

УДК 532.529

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО РЕЖИМА ИСТЕЧЕНИЯ ПАРОВОДОЯНОЙ СМЕСИ

А. Н. Шулюпин

Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,  
683002 Петропавловск-Камчатский  
E-mail: nigtc@kscnet.ru

Представлены результаты измерения статического давления в критическом режиме истечения пароводяной смеси из длинных труб диаметром 50,2 и 100,1 мм на различных расстояниях от их выходного сечения. Измерения выполнены при расходах и энтальпиях смеси, характерных для геотермальных теплоносителей. Установлено, что экспериментально полученные расходы смеси значительно превышают результаты расчетов по известным моделям.

**Ключевые слова:** пароводяная смесь, критический режим истечения, давление, расход, энтальпия.

**Введение.** Использование геотермальных ресурсов является перспективным направлением развития энергетики. Для выработки электроэнергии, как правило, используются ресурсы парогидротермальных месторождений, теплоноситель которых представляет собой смесь пара и воды. В процессе освоения таких месторождений нередко имеет место критический режим истечения смеси, используемый в технологиях определения значений расходных параметров скважин.

С целью апробации новых технологий и испытания оборудования для геотермальной энергетики в 1985–1991 гг. на Камчатке проводились экспериментальные исследования течений пароводяных смесей на специально созданном стенде. Работы велись по трем направлениям: апробация методов измерения расходных параметров смеси, исследование гидравлических сопротивлений при ее транспортировке, определение условий устойчивости течения в трубопроводах. Большинство экспериментов относилось к первому направлению, в рамках которого в основном исследовался критический режим истечения.

Экспериментальные данные о критическом режиме истечения, полученные на стенде, частично опубликованы в работах [1, 2] и использованы для обоснования методов измерения расходных параметров смеси в сопле (на основе измерения давлений перед соплом и в его выходном сечении) и в длинной трубе (на основе измерения давления в выходном сечении и перепада давления вверх по потоку от выходного сечения). В настоящей работе представлены не опубликованные ранее экспериментальные данные, не имеющие непосредственного отношения к разработке методов измерения расходных параметров смеси, но представляющие интерес при изучении критического режима течения, и проведено их сравнение с результатами расчета по формуле Джеймса [3] и известным теоретическим моделям [4].

**Методика и результаты экспериментов.** Настоящему исследованию предшествовало большое количество экспериментов, в которых изучался критический режим истечения пароводяной смеси из цилиндрических сопел различных длин и диаметров. Обнару-

жено, что условия вверх по потоку оказывают влияние на расходные параметры смеси. Целями проведенных работ являлись обоснование эмпирической формулы, связывающей расходные параметры смеси с измеряемым давлением в режиме истечения, и в перспективе замена эмпирической формулы теоретическим расчетом. Разработка адекватной модели критического потока на основе теории позволит повысить надежность методов определения расходных параметров смеси с помощью результатов измерения давления в критическом режиме истечения, а также расширить возможности математического моделирования течения в скважинах с использованием численного решения системы уравнений, основанной на уравнениях неразрывности, движения и энергии [2]. При расчете течений в скважинах 01 Мутновского и К-15 Паужетского месторождений на Камчатке обнаружено, что модели, в которых учитывается влияние на ускорение смеси составляющей градиента давления, играющей существенную роль при высоких скоростях, оказываются неприменимы при максимальных расходах. Установлено, что при расчете течений по моделям, в которых скорости смеси приближенно равны 200 м/с, градиент давления стремится к бесконечности, т. е. режим течения становится критическим. Следовательно, при больших скоростях расчет невозможен. В то же время на практике в указанных скважинах при максимальных расходах скорости достигают значений, равных 300 м/с.

Целью эксперимента являлось исследование условий возникновения критического режима течения, т. е. условий вверх по потоку от выходного сечения, которые могут быть использованы при разработке модели высокоскоростного (включая критический режим) течения. В качестве характеристики таких условий было выбрано статическое давление, поскольку его измерение не создает в потоке дополнительных возмущений и технически легко осуществимо. Кроме того, в эксперименте предполагалось оценить возможность использования перепада давления вверх по потоку от выходного сечения для определения расходных параметров смеси.

В рассматриваемом эксперименте пар и вода по отдельным трубопроводам поступали в смеситель, из которого полученная смесь подавалась на экспериментальный участок. Параметры смеси определялись на основе измерений параметров однофазных потоков перед смесителем. Пароводяная смесь вытекала горизонтально в атмосферу из труб длиной 4 м с внутренним диаметром (с учетом тепловых расширений), равным 50,2 и 100,1 мм. Для измерения статического давления в стенках труб имелось пять отверстий диаметром 4 мм. Первое отверстие располагалось на расстоянии от выходного сечения, равном 4 мм (расстояние до центра отверстия), второе — на расстоянии от первого отверстия, равном одному диаметру трубы, третье — на расстоянии от второго отверстия, равном одному диаметру трубы, четвертое — на расстоянии от третьего отверстия, равном двум диаметрам трубы, пятое — на расстоянии от четвертого отверстия, равном трем диаметрам трубы. Давление измерялось с помощью образцовых манометров класса точности 0,25. Отметим, что в пароводяном потоке имеют место значительные колебания давления, поэтому реальная погрешность его измерения больше инструментальной и составляет приблизительно 0,05 бар. Кроме того, между вторым и первым, третьим и вторым, четвертым и третьим, пятым и четвертым отверстиями с помощью U-образных дифманометров измерялись перепады давления  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$ ,  $\Delta p_3$ ,  $\Delta p_4$  соответственно, влияние колебаний на которые менее существенно и, следовательно, абсолютные погрешности измерения которых меньше.

В табл. 1, 2 представлены результаты измерений перепадов давления, давлений в первом и пятом отверстиях, а также массовые расходы  $G$  и удельные энтальпии заторможенного потока смеси  $h_0$ . Проведено две серии экспериментов для трубы диаметром 50,2 мм (эксперименты 1–9 и 10–31) и одна серия для трубы диаметром 100,1 мм. В некоторых опытах критический режим истечения был не полностью установившимся. Согласно [2]

Таблица 1

Параметры критического режима истечения пароводяной смеси из трубы диаметром 50,2 мм

Номер опыта	$G$ , кг/с	$h_0$ , кДж/кг	$p_1$ , бар	$\Delta p_1$ , бар	$\Delta p_2$ , бар	$\Delta p_3$ , бар	$\Delta p_4$ , бар	$p_5$ , бар
1	2,19	1969	2,68	0,421	0,150	0,233	0,234	3,54
2	2,03	1945	2,33	0,413	0,147	0,232	0,209	3,33
3	1,71	1832	1,93	0,308	0,161	0,185	0,187	2,73
4	2,05	1617	1,91	0,360	0,146	0,196	0,189	2,80
5	2,31	1629	2,32	0,453	0,178	0,243	0,234	3,43
6	2,47	1639	2,56	0,466	0,183	0,256	0,246	3,61
7	2,91	1496	2,55	0,482	0,196	0,256	0,252	3,78
8	2,43	1465	1,97	0,413	0,179	0,214	0,204	2,91
9*	4,97	949	—	—	0,248	0,287	0,313	3,83
10	1,94	2309	2,90	0,433	0,173	0,257	0,260	3,93
11	1,81	2283	2,58	0,389	0,161	0,227	0,229	3,57
12	1,60	2310	2,28	0,368	0,148	0,210	0,215	3,20
13	1,45	2293	1,97	0,325	0,116	0,182	0,179	2,75
14	1,22	2270	1,63	0,283	0,099	0,162	0,158	2,32
15	2,16	2071	2,89	0,488	0,195	0,268	0,268	4,07
16	1,98	2094	2,60	0,430	0,174	0,232	0,244	3,57
17	1,73	2044	2,13	0,399	0,146	0,210	0,211	3,05
18	1,51	2010	1,80	0,330	0,110	0,189	0,174	2,56
19	2,35	1917	2,83	0,519	0,193	0,276	0,267	4,04
20	2,19	1898	2,49	0,483	0,169	0,244	0,242	3,62
21	1,99	1880	2,17	0,429	0,178	0,216	0,209	3,17
22*	1,75	1790	1,83	0,376	0,137	0,180	0,183	2,68
23	2,69	1658	2,76	0,540	0,211	0,276	0,268	4,00
24	2,50	1668	2,39	0,477	0,187	0,242	0,237	3,50
25	2,96	1540	2,77	0,561	0,218	0,281	0,274	4,04
26	2,80	1538	2,49	0,507	0,205	0,267	0,250	3,67
27	3,44	1387	2,82	0,560	0,225	0,283	0,278	4,14
28	3,85	1276	2,78	0,565	0,226	0,278	0,276	4,07
29*	3,63	1255	2,54	0,545	0,236	0,256	0,263	3,83
30	4,23	1172	2,79	0,587	0,267	0,268	0,295	4,14
31*	4,53	1107	2,76	0,624	0,126	0,258	0,290	4,21

\* Эксперименты, в которых наблюдался повышенный уровень колебаний давления.

критический режим считается полностью установившимся при давлении истечения  $p_1$ , превышающем противодавление, равное 0,3 бар. Заметим, что в рассматриваемом случае истечение смеси происходило при атмосферном давлении на уровне моря, соответственно противодавление составляло приблизительно 1 бар.

**Анализ полученных данных.** На рис. 1 представлены зависимости экспериментальных и расчетных значений плотности массового расхода (массового расхода на единицу площади) смеси от удельной энтальпии заторможенного потока. Расчетное значение определялось по формуле Джеймса [3], полученной в результате обобщения экспериментальных данных в близких условиях:

$$j_j = 59\,000 \frac{p_{cr}^{0,96}}{h_0^{1,102}} \quad (1)$$

Таблица 2

Параметры критического режима истечения пароводяной смеси из трубы диаметром 100,1 мм

Номер опыта	$G$ , кг/с	$h_0$ , кДж/кг	$p_1$ , бар	$\Delta p_1$ , бар	$\Delta p_2$ , бар	$\Delta p_3$ , бар	$\Delta p_4$ , бар	$p_5$ , бар
1	7,73	2138	2,49	0,507	0,244	0,179	0,183	3,53
2	7,12	2190	2,32	0,532	0,242	0,153	0,188	3,38
3	6,00	2142	1,89	0,455	0,197	0,124	0,147	2,80
4	5,20	2017	1,55	0,376	0,164	0,115	0,131	2,32
5*	4,13	1912	1,21	0,278	0,111	0,103	0,095	1,78
6*	3,90	1828	1,16	0,253	0,111	0,093	0,088	1,64
7	9,08	1880	2,62	0,530	0,250	0,227	0,215	3,76
8	8,51	1853	2,29	0,556	0,224	0,193	0,187	3,43
9	7,57	1790	2,00	0,488	0,200	0,161	0,169	3,01
10	7,06	1750	1,82	0,462	0,180	0,147	0,157	2,75
11	6,64	1844	1,82	0,462	0,176	0,180	0,125	2,73
12	7,33	1949	2,11	0,507	0,204	0,204	0,150	3,15
13	8,79	2006	2,69	0,550	0,242	0,239	0,194	3,86
14	10,30	1720	2,63	0,582	0,247	0,263	0,226	3,86
15	9,61	1681	2,39	0,582	0,225	0,221	0,169	3,53
16**	9,76	1767	2,68	0,532	0,272	0,253	0,215	3,90
17	9,24	1749	2,29	0,556	0,222	0,222	0,173	3,43
18	8,43	1694	2,11	0,536	0,211	0,204	0,164	3,15
19	7,54	1626	1,71	0,470	0,161	0,159	0,126	2,56
20	6,48	1498	1,33	0,352	0,115	—	0,111	1,97

\* Эксперименты, в которых критический режим истечения смеси является не полностью установившимся.

\*\* Эксперимент, в котором наблюдался повышенный уровень колебаний давления.

Здесь  $j_J$  — плотность массового расхода смеси;  $p_{cr}$  — давление в критическом режиме истечения (использовалось давление  $p_1$  в ближайшей к выходному сечению точке измерения);  $h_0$  — удельная энтальпия заторможенного потока смеси.

Сравнение плотностей массового расхода смеси подтверждает высокую точность расчетов по формуле (1). Заметим, что согласно [3] в диапазоне значений энтальпии заторможенного потока от 540 до 2800 кДж/кг при давлении в критическом режиме истечения до 4,4 бар погрешность не превышает 3 %. В рассматриваемом случае максимальные отклонения несколько больше, что может быть объяснено следующим образом. Во-первых, в экспериментах, проведенных Р. Джеймсом, давление в критическом режиме истечения измерялось в случае, когда отверстие диаметром 6,4 мм было расположено на расстоянии от выходного сечения вверх по потоку, равном 6,4 мм, а в экспериментах, выполненных в данной работе, давление измерялось ближе к выходному сечению (на расстоянии от него, равном 4 мм). Поэтому имеет место незначительное занижение расчетной плотности массового расхода. Во-вторых, в пароводяном потоке наблюдаются колебания давления, которые в опытах проявлялись в виде колебаний стрелки манометра. Оценки среднего значения по таким измерениям могут существенно различаться вследствие влияния субъективных факторов. Проведенные ранее исследования показывают, что различие данных, полученных в аналогичных сериях экспериментов по измерению давления  $p_{cr}$  в критическом режиме истечения, может превышать 3 %. В свою очередь погрешность измерения давления  $p_{cr}$  влияет на погрешность определения плотности массового расхода по формуле (1).

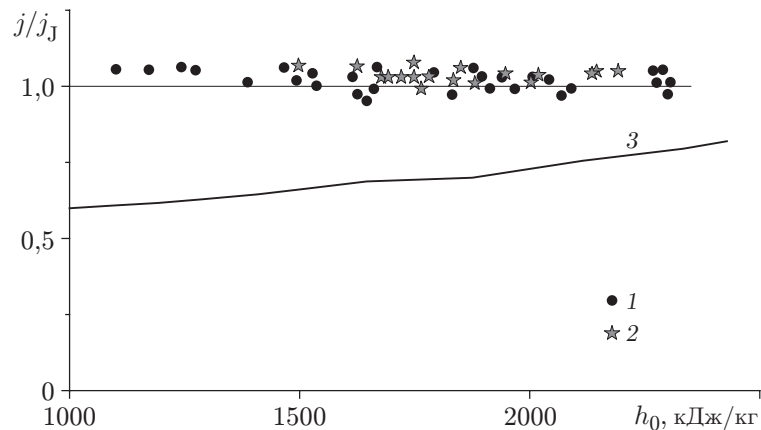


Рис. 1. Зависимости отношений экспериментальных и рассчитанных по гомогенной метастабильной модели значений плотности критического массового расхода смеси к значениям плотности массового расхода, вычисленным по формуле Джеймса, от удельной энтальпии заторможенного потока смеси:  
1, 2 — экспериментальные данные (1 —  $D = 50,2$  мм; 2 —  $D = 100,1$  мм); 3 — результаты расчета по модели при давлении истечения, равном 2 бар

Наиболее известными моделями, описывающими критические двухфазные потоки, являются гомогенная равновесная и гомогенная метастабильная модели [4]. В гомогенной равновесной модели предполагается изотропность двухфазной среды, а также термодинамическое равновесие и равенство скоростей фаз, в гомогенной метастабильной модели — изотропность двухфазной среды, равенство скоростей фаз и начальное равенство температур фаз. При этом считается, что с учетом разрыва градиента давления уменьшение давления вниз по потоку обуславливает переход среды в метастабильное состояние, поскольку тепло- и массообмен между фазами не успевает произойти. В этом случае изменение плотности среды происходит только вследствие изменения плотности пара. Скорость гомогенного потока в критическом режиме зависит от изменения плотности [4]:

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} \quad (2)$$

( $v_{cr}$  — скорость критического потока;  $p$  — давление;  $\rho$  — плотность).

Поскольку в метастабильной модели плотность среды изменяется менее существенно, значения скорости и соответственно плотности массового расхода, вычисленные по данной модели, превышают значения этих величин, вычисленные по гомогенной равновесной модели. В работе [4] указано, что значения плотности массового расхода, полученные с использованием гомогенной равновесной модели, занижены по сравнению с экспериментальными данными, а полученные в результате расчета по гомогенной метастабильной модели — завышены. Однако это предположение не подтверждают экспериментальные данные настоящей работы.

На рис. 1 представлены результаты расчета плотности массового расхода по гомогенной метастабильной модели и по формуле (1) при давлении истечения, равном 2 бар. Следует отметить, что при расчете по формуле (1) в случае, когда давление на выходе равно 2 бар, давление в точке измерения должно быть выше, т. е. экспериментально полученные расходы должны превышать рассчитанные по указанной формуле. На рис. 1 видно, что значения плотности массового расхода, полученные по гомогенной метастабильной модели, занижены. Заметим, что значения плотности массового расхода  $j$ , вычисленные

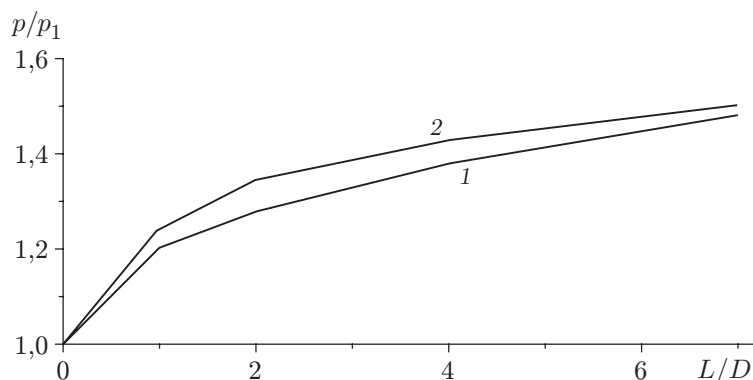


Рис. 2. Зависимость отношения давления в трубе к давлению на выходе из нее от расстояния до выходного сечения:  
 1 — опыт 24 ( $D = 50,2$  мм); 2 — опыт 15 ( $D = 100,1$  мм)

с помощью метастабильной модели, больше значений  $j$ , полученных по равновесной модели, поэтому различие экспериментально найденных расходов и результатов расчета по гомогенной равновесной модели будет еще более существенным.

Одним из возможных способов достижения лучшего согласования расчетных и экспериментальных данных является использование моделей со скольжением фаз. При этом в случае состояния сухого насыщенного пара вследствие отсутствия жидкости различия между моделями со скольжением и гомогенными моделями незначительны. В случае энтальпии, соответствующей состоянию сухого насыщенного пара, различие результатов расчетов по равновесным моделям и формуле (1) составляет 17 %. В проведенных экспериментах область, в которой состояние смеси близко к состоянию сухого насыщенного пара, не рассматривалась. Тем не менее проведенные ранее эксперименты с соплами показали, что в данной области экспериментально полученные расходы всегда завышены по сравнению с вычисленными по формуле (1), т. е. различие результатов расчетов по моделям с экспериментальными данными должно быть не менее указанной величины. Следовательно, введение в модель процесса скольжения не позволяет полностью решить проблему согласования расчетных и экспериментальных данных. Полное их согласование возможно только при использовании неравновесных моделей, в которых предполагается возникновение и увеличение отклонения от термодинамического равновесия фаз на значительном расстоянии от выходного сечения вверх по потоку.

В отсутствие адекватной модели течения провести анализ распределения статического давления по длине трубы при формировании критического потока затруднительно. Очевидно, что для труб разного диаметра геометрического подобия не существует.

На рис. 2 представлено распределение безразмерного давления по относительной длине трубы в опыте 24 для трубы диаметром 50,2 мм и в опыте 15 для трубы диаметром 100,1 мм, характеризующихся близкими термодинамическими условиями. Аналогичное распределение давления имеет место в опытах 22 и 9 (кривая, полученная в опыте 22, практически совпадает с кривой в опыте 24, а кривая, полученная в опыте 9, — с кривой в опыте 15). Данные, приведенные в табл. 1, 2, показывают, что для трубы диаметром 50,2 мм градиент давления вблизи выходного сечения больше, чем для трубы диаметром 100,1 мм, а на рис. 2 видно, что градиент нормированного давления больше для трубы диаметром 100,1 мм.

**Заключение.** В результате проведенного исследования получены экспериментальные данные о критическом режиме истечения пароводяной смеси из длинных труб, подтверж-

дающие справедливость эмпирической формулы Джеймса (1). Установлено, что экспериментально полученные расходы значительно превышают соответствующие значения, вычисленные по известным моделям. Полученные данные о распределении статического давления по длине трубы могут быть использованы в дальнейшем при разработке адекватной модели критического пароводяного потока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шулюпин А. Н., Алексеев В. И. Измерение расходных параметров пароводяных скважин // Теплоэнергетика. 1995. № 11. С. 46–49.
2. Шулюпин А. Н. Пароводяные течения на геотермальных промыслах. Петропавловск-Камчатский: Камчат. гос. техн. ун-т, 2004.
3. James R. Steam-water critical flow through pipes // Proc. Inst. Mech. Engrs. 1962. V. 176, N 26. P. 741–748.
4. Фисенко В. В. Критические двухфазные потоки. М.: Атомиздат, 1978.

*Поступила в редакцию 12/X 2010 г.,  
в окончательном варианте — 16/II 2011 г.*

---