

**ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ НА ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ  
В СИСТЕМЕ ВОДА-ВОДЯНОЙ ПАР**



**INFLUENCE OF POROUS MEDIA ON PHASE TRANSITIONS  
IN THE WATER-WATER STEAM SYSTEM**

**Шарнов А.И.**

кандидат технических наук,  
доцент,  
доцент кафедры машин и оборудования  
нефтяных и газовых промыслов,  
Армавирский механико-технологического институт  
(филиал) Кубанский государственный  
технологический университет  
a.i.sharnov@mail.ru

**Аннотация.** В статье показано, что давление и температура насыщенного водяного являются основными термодинамическими характеристиками, процесса пароинъекции нефтяного пласта. Показано, что знание закономерностей фазовых переходов в системе вода-водяной пар непосредственно в пористой среде необходимо для правильного расчета тепла массообменных процессов, идущих при термических методах интенсификации добычи нефти и газа. Значительные расхождения по температуре и давлению фазовых переходов в системе вода-водяной пар вне пористой среды и в ее присутствии, должны обязательно учитываться в расчетах процессов термического воздействия на пласт и его призабойную зону.

**Ключевые слова:** пористая среда, фазовые переходы, водяной пар, вода, система, температура, давление, порода, пласт, термическое воздействие.

**Sharnov A.I.**

Ph.D.,  
Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
of Machinery and Equipment  
for Oil and Gas Fields,  
Armavir Institute of Mechanics  
and Technology (branch)  
Kuban State Technological University  
a.i.sharnov@mail.ru

**Annotation.** The article shows that pressure and temperature of saturated water are the main thermodynamic characteristics of the process of steam injection of an oil reservoir. It is shown that knowledge of the laws of phase transitions in the water-steam system directly in a porous medium is necessary for the correct calculation of the heat of mass transfer processes occurring during thermal methods of intensifying oil and gas production. Significant differences in temperature and pressure of phase transitions in the water-steam system outside the porous medium and in its presence must be taken into account in the calculations of the processes of thermal impact on the formation and its bottom-hole zone.

**Keywords:** porous medium, phase transitions, water vapor, water, system, temperature, pressure, rock, formation, thermal effect.

Давление и температура насыщенного водяного пара, применяющегося в целях пароинъекции нефтяного пласта, являются основными термодинамическими характеристиками, определяющими все элементы указанного процесса. Обычно эти характеристики определяются вне пористой среды, причем, как известно, температура в процессе парообразования и конденсатообразования строго зависит от давления [1, 44]. Результаты, полученные в отсутствие пористой среды (табличные данные [2, 18]), затем применяются непосредственно к расчетам фазовых состояний водяного пара в породе. Было замечено, что пористая среда влияет на фазовые переходы как в газоконденсатных системах, так и в системах нефть-газ-парафин (анализ работ по этому вопросу приведен в [3, 82]).

Знание закономерности фазовых переходов в системе вода-водяной пар непосредственно в пористой среде необходимо для правильного расчета тепла массообменных процессов, идущих при термических методах интенсификации добычи нефти и газа: при пароинъекции пласта, сопровождающейся образованием зоны горячего конденсата; при проталкивании оторочки пара не нагретой водой при движении по пласту очага горения; при тепловых методах воздействия на призабойную зону пласта, в частности, при сушке призабойной зоны газового пласта от остаточной влаги с целью повышения газопроницаемости.

Фазовые переходы в системе вода-водяной пар имеют место в пристволенной области бурящихся скважин, и в грунте, окружающем «горячий» трубопровод.

В описанных выше процессах фазовые переходы связаны с образованием и разрушением полимолекулярных слоев воды, свойства которой резко отличны от свойств свободной воды [4]. Именно на эти аномальные слои, толщина которых может достигать нескольких сот диаметров молекулы воды, и приходится значительные величины энергетических показателей, характеризующих испарение воды и конденсацию водяных паров в пористой среде. Если принять толщину  $h$  полимолекулярного аномального слоя равной  $500\delta$  ( $\delta = 3-8$  см – диаметр молекулы воды), то  $h = 1,5 \times 10^{-4}$  мм, т.е. толщина аномального слоя воды соизмерима со средним размером частиц пелитов, и в частности, с размером частиц глинистых разностей пласта.

Были проведены эксперименты на базе инструментальной среды визуального проектирования и математического моделирования Stratum-2000, целью которых являлось установление зависимости давления от температуры в процессах парообразования и конденсации в пористой среде при заданной водонасыщенности.

Моделировался элемент пласта, представляющий собой металлическую колонку диаметром 38 мм и длиной 300 мм, заполненную модельной породой. Для составления модельных пород с различными характеристиками использовались смеси кварцевого песка (с диаметром частиц от 0,4 до 1 мм) и маршаллита (с диаметром частиц от 130 до 180 микрон). Характеристика применяющихся пород приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика модельных пород

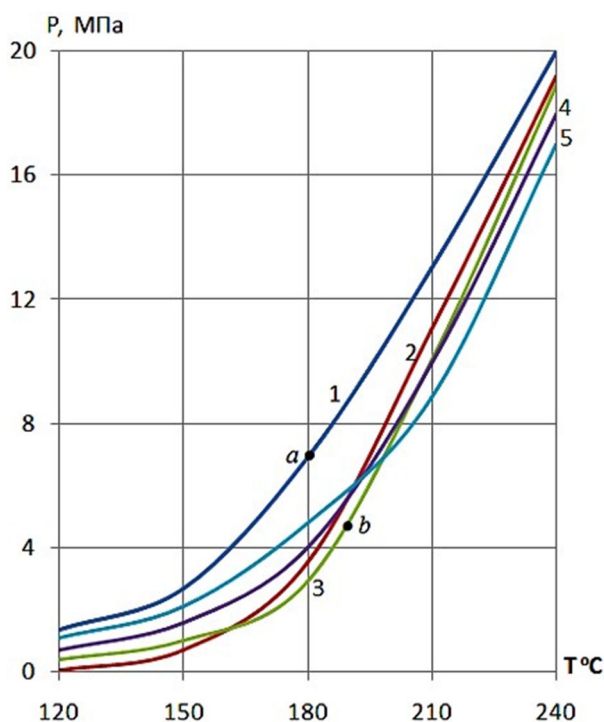
Номера	Состав породы	Пористость,	Проницаемость,	Удельная
I	Колонка без пористой среды	–	–	–
II	Кварцевый песок	26	16,20	63
III	80 % кварц. песок+	22	7,85	110
IV	60 % кварц. песок+	19	4,81	159
V	40 % кварц. песок+	17	2,24	210

После набивки колонок, пористую среду в них насыщали под вакуумом дистиллированной водой с одновременным замером пористости и проницаемости. Удельная поверхность определялась по формуле, приведенной в [3 55]. Для удаления из пор части свободной воды и возможно оставшегося воздуха, колонки нагревали до 120 °С, и испаряли 50 % воды, от первоначального ее количества в пористых средах.

Таким образом, во всех колонках с пористой средой оставалось 50 % воды. Затем колонки помещали в термостатируемый шкаф и начинали их нагрев, причем на каждом уровне температуры нагрева, колонки выдерживались в течение двух часов для установления в системе пористая среда-вода-пар термодинамического равновесия, о наступлении которого судили по изменениям в колонках давления. Аналогично производили замеры при обратном ходе, т. е. при ступенчатом остывании колонок до исходной температуры эксперимента. Температура пористых сред регистрировалась с помощью хромелькопелевых термопар, выведенных на потенциометр ЭПП-09, давление – образцовыми манометрами ОМН. Результаты экспериментов представлены в таблице 2 и на рисунке 1. Давление водяного пара в пористой среде меньше давления пара свободной воды (при одной и той же температуре); темп роста (в прямом ходе) и снижение (в обратном ходе) давления в пористой среде выше, чем вне ее.

Таблица 2 – Зависимость водяного пара от температуры в различных пористых средах

Т °С	Р, МПа									
	Номера колонок									
	I		II		III		IV		V	
	нагрев	охлаждение	нагрев	охлаждение	нагрев	охлаждение	нагрев	охлаждение	нагрев	охлаждение
120	0,085	0,084	0,010	0,012	0,025	0,045	0,045	0,072	0,095	0,132
150	0,225	0,226	0,055	0,068	0,09	0,120	0,125	0,167	0,16	0,215
180	0,62	0,623	0,375	0,430	0,25	0,335	0,325	0,44	0,415	0,54
210	1,105	1,107	1,105	1,150	0,975	1,035	0,945	1,017	0,875	0,97
240	2,08	2,08	1,95	1,95	1,93	1,93	1,87	1,87	1,83	1,83



**Рисунок 1** – Зависимость давления водяного пара от температуры:

- 1 – вода без песка; 2 – кварцевый песок; 3 – кварцевый песок+20 % маршаллита;  
4 – кварцевый песок + 40 % маршаллита; 5 – кварцевый песок+60 % маршаллита

Переходя к количественному анализу полученных результатов, воспользуемся соотношением, связывающим теплоту испарения воды  $Q_1(v)$ , в капиллярно-пористом материале при данном влагосодержании с теплотой испарения свободной воды  $Q_0$  [4]:

$$\Delta Q = Q_1(v) - Q_0 = RT^2 \left( \frac{\partial \ln P_{II}}{\partial T} - \frac{\partial \ln P_H}{\partial T} \right) \quad (1)$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $T$  – температура;  $P_{II}$  – давление пара в капиллярно-пористом теле при данном влагосодержании;  $P_H$  – давление насыщенного пара свободной воды при температуре  $T$ .

Учитывая, что в структуру поровой воды входит слой аномальной воды, величина  $\Delta Q$  в выражении (1) численно равна теплоте испарения аномального слоя. Работу отрыва ( $A$ ) одного моля воды в капиллярно-пористом теле при данном влагосодержании можно определить из выражения [4]:

$$A_0 = RT \ln \frac{P_{II}}{P_H} \quad (2)$$

Для иллюстрации количественной разницы в энергетических затратах на испарение свободной воды и воды в пористой среде, по формуле (2) произведен расчет, причем использовались данные, полученные в эксперименте.

Сравнивались два значения давления при температуре 195 °С: в колонке без пористой среды (точка  $a$  на кривой 1), и в колонке, набитой смесью кварцевого песка с 20 % маршаллита (точка  $b$  на кривой 3). Имеем в точках  $a$  и  $b$ :  $P_{II} = 0,93$  МПа,  $P_H = 0,49$  МПа,  $T = 195$  °С. После подстановки этих данных, а также значения газовой постоянной  $R = 8,3$  Дж/град· моль, в формулу (2), получаем:  $A = 149,2$  кДж/кг.

Таким образом, теплота парообразования в пористой среде для рассмотренного примера существенно превышает ее значение для свободной воды, что и обусловило различные количественные характеристики процесса испарения при нагреве свободной и пленочной воды.

Из данных эксперимента очевидно наличие петли «гистерезиса», образуемой разницей в показателях для прямого и обратного хода, а также расхождение опытных данных для различных композиций модельной породы (рис. 1, табл. 2).

Полученные результаты могут быть объяснены на базе существующих представлений о механизме сорбционно-адсорбционных и десорбционных явлений. Суть этих представлений сводится к тому, что как десорбция влаги с поверхности (прямой ход в наших экспериментах), так и процессы сорбции-адсорбции обратный ход – охлаждение и конденсация пара), существенно зависят от характеристики поверхности, в частности, от ее величины, т. е. от избытка поверхностной энергии тела. При этом процессы десорбции и сорбции-адсорбции характеризуются различием в количествах поглощаемого или выделяемого тепла. Композиция примененных в опытах модельных пористых сред обеспечили заметное отличие по их удельной поверхности в каждой модели (табл. 1). Этим и объясняется как явление гистерезиса, так и количественная разница в результатах экспериментов для каждой модельной породы.

Таким образом, необходимо подчеркнуть, что значительные расхождения по температуре и давлению фазовых переходов в системе вода-водяной пар вне пористой среды и в ее присутствии, должны обязательно учитываться в расчетах процессов термического воздействия на пласт и его призабойную зону. Правильность этих расчетов должна основываться на предварительном получении экспериментальной зависимости РП = для водяного пара в присутствии породы пласта, выбранного в качестве объекта термического воздействия.

### Литература

1. Кудинов В.А. Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов (для бакалавров). – 2-е изд., перераб. и доп. / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк. – М. : Юрайт, 2013. – 566 с.
2. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. Рек. Гос. Службой стандартных справочных данных. – 2-е изд., перераб. и доп. / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.
3. Котяхов Ф.И. Физика нефтяных и газовых коллекторов. – М. : Недра, 1977. – 287 с.
4. Лыков А.В. Теория сушки : учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.

### References

1. Kudinov V.A. Technical thermodynamics and heat transfer: a textbook for colleges (for bachelors). – 2nd edition, revised and expanded / V.A. Kudinov, E.M. Kartashov, E.V. Stefanyuk. – M. : Yurayt, 2013. – 566 p.
2. Rivkin S.L. Thermodynamic properties of water and water vapor: Handbook. Recommended by the Government Standard Reference Data Service. – 2nd edition, revised and expanded / S.L. Rivkin, A.A. Alexandrov. – M. : Energoatomizdat, 1984. – 80 p.
3. Kotyakhov F.I. Physics of oil and gas reservoirs. – M. : Nedra, 1977. – 287 p.
4. Lykov A.V. Theory of drying : textbook. – 2nd edition, revised and expanded. – M. : Energy, 1968. – 472 p.