

Член-корреспондент АН СССР М. А. СТЫРИКОВИЧ и Г. Е. ХОЛОДОВСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЗНЫХ НАПОРОВ ЦИРКУЛЯЦИИ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ ВОДЯНОГО ПАРА

Как известно, теория подобия применительно к движению газожидкостных смесей вообще и паро-водяных смесей в трубах паровых котлов, в частности, до сего времени мало разработана и не дает достаточно точного метода пересчета на условия, отличные от условий эксперимента. Поэтому все расчеты циркуляции в паровых котлах, необходимые для создания надежного в эксплуатации и наиболее экономичного по затрате металла котлоагрегата, базируются на результатах изучения полезных напоров циркуляции, проводимого при рабочих давлениях на трубах применяемых в котлостроении диаметров и в полном диапазоне необходимых расходов воды и пара.

В СССР изучение циркуляции в паровых котлах было широко поставлено с 1931 г. (1). В результате работ, проведенных в Центральном котлотурбинном институте им. Ползунова (ЦКТИ) в предвоенные годы, были созданы нормы расчета циркуляции паровых котлов низкого и среднего давлений (до 40 кг/см^2). Непосредственно перед войной в ЦКТИ (2) были получены экспериментальные данные по полезным напорам циркуляции при давлениях до 112 кг/см^2 . Только на трубах малого диаметра ($25,5 \text{ мм}$), не применяемых в стационарных котлах с естественной циркуляцией, опыты ЦКТИ были доведены до 182 кг/см^2 . Почти одновременно во ВТИ (3) были проведены в меньшем масштабе также опыты на трубах малого диаметра при давлении до 140 кг/см^2 .

В связи с началом массового перехода отечественной энергетики на высокие (до 110 кг/см^2) давления пара и с постановкой вопроса о при-

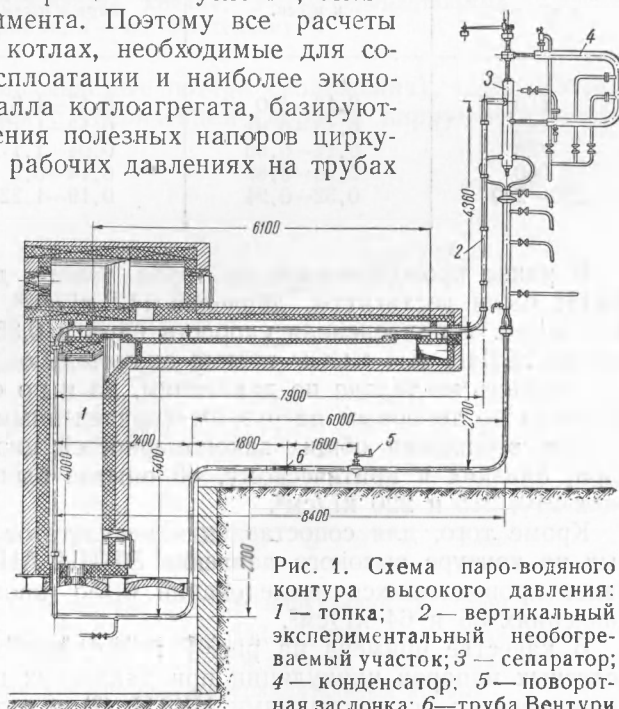


Рис. 1. Схема паро-водяного контура высокого давления: 1 — топка; 2 — вертикальный экспериментальный необогреваемый участок; 3 — сепаратор; 4 — конденсатор; 5 — поворотная заслонка; 6 — труба Вентури для измерения скорости циркуляции

менении сверхвысоких (до 200 кг/см²) давлений, возникла необходимость поставить изучение циркуляции при этих давлениях и тех диаметрах труб (50—60 мм), которые должны были иметь наибольшее применение в стационарных котлах с естественной циркуляцией. Проведение этих работ было организовано в Энергетическом институте АН СССР.

Для изучения полезных напоров циркуляции в трубах диаметром 56 мм в ЭНИН АН СССР был создан полупромышленный стенд (рис. 1), рассчитанный на работу при давлениях вплоть до критического (225 кг/см²) и при тепловых нагрузках, а следовательно, и паропроизводительностях, значительно превышающих нагрузки и паропроизводительности единичной трубы наиболее мощного современного котла. Экспериментальные работы начаты были в 1946 г. и закончены в 1949 г.

Изучение циркуляции на контуре высокого давления проводилось в основном при абсолютных давлениях пара в 113, 142, 182 и 200 кг/см². Всего на этих давлениях было проведено 470 опытов, охватывающих следующие пределы параметров, определяющих циркуляцию (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Абс. давление пара в кг/см ²	Скорость циркуляции в м/сек.	Приведенная скорость пара в м/сек.	Макс. количество тепла, затраченного на испарение в 10 ⁶ ккал/час
113	0,12—1,0	0,17—1,3	221,0
142	0,13—0,91	0,12—1,15	224,0
182	0,14—0,96	0,04—1,1	242,3
200	0,20—0,89	0,14—0,9	193,9
210—220	0,32—0,94	0,19—1,22	186,0

В ранее проводившихся на трубе такого диаметра исследованиях ЦКТИ были достигнуты: давление 112 кг/см², скорость циркуляции в 0,75 м/сек. и приведенная скорость пара в 0,35 м/сек. Таким образом, работы ЭНИН АН СССР весьма значительно расширили исследованную область не только по давлениям, но и по скоростям циркуляции и особенно по тепловым нагрузкам (приведенным скоростям пара).

Для выявления общих закономерностей циркуляции при давлениях пара, близких к критическому, 66 опытов было проведено при давлениях 210, 215 и 220 кг/см².

Кроме того, для сопоставления результатов исследований, полученных на контуре высокого давления ЭНИН АН СССР, с результатами ранее проводившихся исследований было проведено 134 опыта при давлениях 35 и 64 кг/см².

В качестве примера на рис. 2 приведены результаты исследования полезных напоров циркуляции при давлениях пара 35 кг/см² и их сопоставление с исследованиями ЦКТИ (2) и с теоретическими полезными напорами, определенными по формуле:

$$p_{пол} = \beta H(\gamma' - \gamma'') - \Delta p_{тр} \text{ кг/м}^2, \quad (1)$$

где β — объемное паросодержание паро-водяной смеси; H — высота опытного участка, равная 1 м; γ' — удельный вес воды при температуре насыщения в кг/м³; γ'' — то же пара; $\Delta p_{тр}$ — потеря трения на 1 м длины трубы, вычисляемая для смеси, как гомогенной жидкости, в кг/м².

Как видно из рис. 2, данные ЭНИН'а хорошо совпадают с ранее полученными при более низких тепловых нагрузках данными ЦКТИ.

Экспериментальные кривые лежат значительно ниже теоретических. Если пренебречь некоторой неточностью расчетного определения $\Delta p_{тр}$, это объясняется потерей полезного напора вследствие того, что скорость пара, поднимающегося в вертикальной трубе, больше скорости

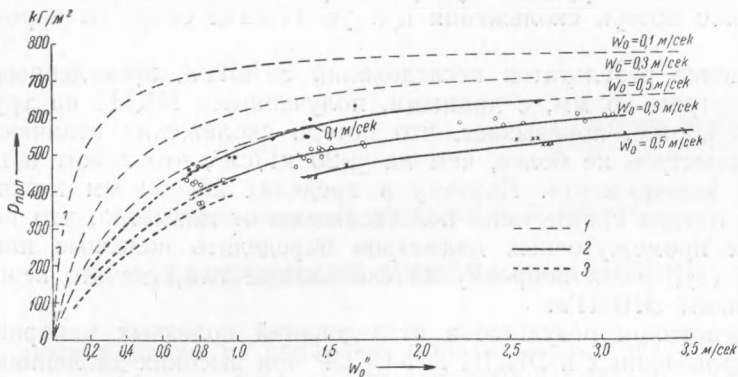


Рис. 2. Зависимость полезного напора циркуляции $p_{пол}$ при абсолютном давлении водяного пара 35 кг/см^2 от скорости циркуляции w_0 и приведенной скорости пара w_0'' . $d_{вн} = 56 \text{ мм}$. 1 — теоретические кривые, 2 — экспериментальные кривые, 3 — по Бродерзону (²)

воды. Эти потери (так называемые потери скольжения), согласно графику рис. 2, уменьшаются с увеличением скорости циркуляции и приведенной скорости пара.

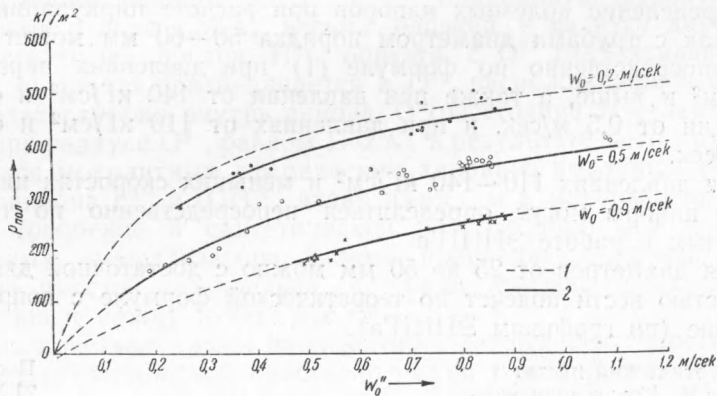


Рис. 3. Зависимость полезного напора циркуляции $p_{пол}$ при абсолютном давлении водяного пара 142 кг/см^2 от скорости циркуляции w_0 и приведенной скорости пара w_0'' . $d_{вн} = 56 \text{ мм}$. 1 — теоретические кривые, 2 — экспериментальные кривые

Результаты исследований, проведенных при высоких давлениях (от 113 до 220 кг/см^2) и иллюстрируемых, например, рис. 3, показывают, что с ростом давления потеря скольжения при прочих равных условиях уменьшается. При этом потеря скольжения при давлении 113 кг/см^2 практически приближается к нулю, начиная от скорости циркуляции 0,7 м/сек.; при давлении 142 кг/см^2 — от скорости 0,5 м/сек., а при давлении 182 кг/см^2 и выше — от скорости 0,2—0,3 м/сек. (т. е. во всем исследованном диапазоне).

Уменьшение потери скольжения, вызываемое снижением относительной скорости пара, при увеличении давления может быть объяснено

происходящим при этом резким уменьшением поверхностного натяжения воды (1). Последнее, повидимому, приводит к уменьшению прочности крупных пузырей пара и их дроблению в потоке жидкости на мелкие пузыри, относительная скорость которых весьма невелика. Большим дроблением крупных пузырей пара естественно объяснить также уменьшение потери скольжения при увеличении скорости паро-водяной смеси.

Сравнение результатов исследований ЭНИН'а, проведенных с трубой диаметром 56 мм, с данными, полученными ЦКТИ на трубе диаметром 25,5 мм, показывает, что потери скольжения отличаются для обоих диаметров не более, чем на ± 20 кг/см², что лежит в пределах точности эксперимента. Поэтому в пределах 25—60 мм можно полагать эти потери практически независимыми от диаметра, что позволяет для всех промежуточных диаметров определять полезные напоры по формуле (1), вводя поправку на скольжение там, где это необходимо, по графикам ЭНИН'а.

На основании результатов исследований полезных напоров циркуляции, проведенных в ЭНИН АН СССР при высоких давлениях, можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что с ростом давления водяного пара, скорости циркуляции и приведенной скорости пара потеря скольжения, снижающая теоретически возможный полезный напор циркуляции, уменьшается.

2. При давлении водяного пара в 182 кг/см² и выше потеря скольжения при всех скоростях циркуляции практически равна нулю, а истинный полезный напор равен теоретическому, определенному с учетом потери трения. При более низких давлениях потеря скольжения отсутствует лишь по достижении определенных скоростей циркуляции, увеличивающихся по мере уменьшения давления.

3. Определение полезных напоров при расчете циркуляции в паровых котлах с трубами диаметром порядка 50—60 мм может производиться непосредственно по формуле (1) при давлениях пара в котле 180 кг/см² и выше, а также при давлении от 140 кг/см² и скоростях циркуляции от 0,5 м/сек. и при давлениях от 110 кг/см² и скоростях от 0,7 м/сек.

4. При давлениях 110—140 кг/см² и меньших скоростях циркуляции полезные напоры могут определяться непосредственно по графикам, приведенным в работе ЭНИН'а.

5. Для диаметров от 25 до 50 мм можно с достаточной для практики точностью вести подсчет по теоретической формуле с поправкой на скольжение (по графикам ЭНИН'а).

Энергетический институт
им. Г. М. Кржижановского
Академии наук СССР

Поступило
21 XII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ М. А. Стырикович, ДАН, 39, № 5 (1943). ² С. М. Бродерзон, О. М. Балдина и А. Р. Сорин, Советское котлотурбостроение, № 1—2 (1941)
³ К. Ф. Роддатис и В. А. Локшин, Изв. ВТИ, № 4 (1941).