

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО  
ЖАЛЮЗИЙНОГО СЕПАРАТОРА ПАРА С РАЗЛИЧНЫМ  
ЧИСЛОМ ПОЛУВОЛН В ПЛАСТИНАХ

А.Г. Филонов, В.С. Юрков

ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет»,  
236022, Россия, г. Калининград, Советский проспект, 1  
E-mail: sudfac@yandex.ru

Рассмотрена методика проведения экспериментальных исследований эффективности горизонтальных жалюзийных сепараторов с различным числом полуволен в пластинах при барботажном испарении солёной воды и давлении пара 0,0199 МПа. Проведен анализ полученных экспериментальных данных.

*горизонтальный жалюзийный сепаратор, критическая скорость пара, барботаж, влажность пара, капельный унос, солесодержание, действительный уровень воды, опреснительная установка*

Горизонтальные жалюзийные сепараторы (ГЖС) широко применяются на отечественных и зарубежных опреснительных установках, судовых и стационарных паровых котлах, испарителях и парогенераторах АЭС для окончательной тонкой очистки пара от капель испаряемой воды. По сравнению с вертикальными и наклонными сепараторами они занимают меньший паровой объём, не требуют организации дренажа уловленной влаги и сложного монтажа [1-6].

Эффективность работы жалюзийного сепаратора оценивается, прежде всего, по величине конечной влажности  $\omega_2$  и критической скорости потока пара в проходном сечении сепаратора  $W_{кр}''$ , при которой имеет место срыв отсепарированной пленки влаги, вызывающий резкое увеличение влажности пара за сепаратором. В качестве дополнительного показателя эффективности используется коэффициент очистки пара  $K_{оч} = \omega_1 / \omega_2$ , где  $\omega_1$  – влажность пара на входе в ГЖС.

К числу конструктивных параметров, влияющих на  $\omega_2$  и  $W_{кр}''$ , относятся геометрические характеристики профиля криволинейного канала жалюзи, приведенные на рис. 1. Эти характеристики без учета толщины пластины  $\delta$  связаны между собой следующими зависимостями:

$$A \cdot \sin \alpha = 2 \cdot R - (2R - C - t) \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

$$b = t \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

$$h = A \cdot n + 2 \cdot a, \quad (3)$$

где  $h$  – ширина пакета пластин.

Пять характерных геометрических размеров профиля связаны между собой формулой (1). Изменение одного из размеров приводит к изменению какого-то другого, если остальные размеры остаются неизменными.

Одной из важных геометрических характеристик профиля криволинейного канала является число ступеней сепарации (число полуволен) –  $n$ . К настоящему времени не существует единого мнения о влиянии числа ступеней сепарации на величины  $\omega_2$  и  $W_{кр}''$  в горизонтальном сепараторе. Большая часть экспериментальных исследований проводилась при атмосферном и избыточном давлениях или на водо-воздушных стендах. В ряде работ влияние геометрических размеров профиля канала жалюзи и числа полуволен  $n$  на величину  $W_{кр}''$  не учитывается.

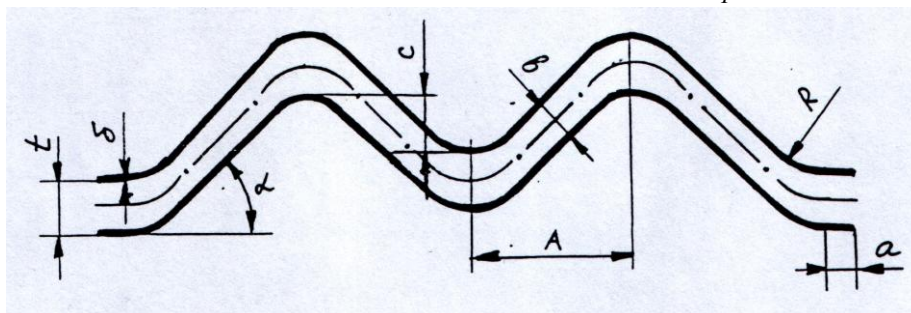


Рис. 1. Геометрические характеристики профиля криволинейного канала:  
 $t$  – расстояние между пластинами;  $\delta$  – толщина пластины;  $\alpha$  – половина угла поворота потока;  $C$  – перекрытие;  $b$  – минимальное расстояние между пластинами;  
 $A$  – расстояние между впадиной и выпуклостью;  $R$  – радиусгиба пластин;  
 $a$  – длина входного и выходного участка канала

Fig. 1. Geometric characteristics of the curved channel:

$t$  – the distance between the plates;  $\delta$  – plate thickness;  $\alpha$  – half of the angle of flow rotation;  $C$  – overlap;  $b$  – the minimum distance between the plates;  $A$  – the distance between the trough and the bulge;  $R$  – radius of bending plates;  $a$  – the length of the input and output channel section

На основании вышеизложенного в настоящей работе были поставлены следующие задачи:

1. Провести исследование эффективности горизонтального жалюзийного сепаратора в условиях вакуума при значениях влажности набегающего потока пара менее 1,0 %. Установить минимальную величину конечной влажности вторичного пара и значения критической скорости пара в проходном сечении сепаратора, которые могут быть получены в этих условиях.

2. Сравнить эффективность сепараторов с различным числом ступеней сепарации (числом полуволен). Установить влияние полуволен и перекрыши пластин в горизонтальном жалюзийном каплеуловителе  $C$  на влажность пара после сепаратора и величину  $W_{кр}''$  при значениях  $\omega_l \leq 1,0$  %.

Опыты проводились на вакуумном пароводяном стенде при абсолютном давлении  $P = 0,0199$  МПа [8, 9]. Исследуемые горизонтальные жалюзийные сепараторы сечением  $100 \times 100$  мм устанавливались на высоте  $H_{по} = 0,435$  м от действительного уровня в испарителе стенда, который представлял собой барботажную колонку с электрическим обогревом мощностью 27 кВт.

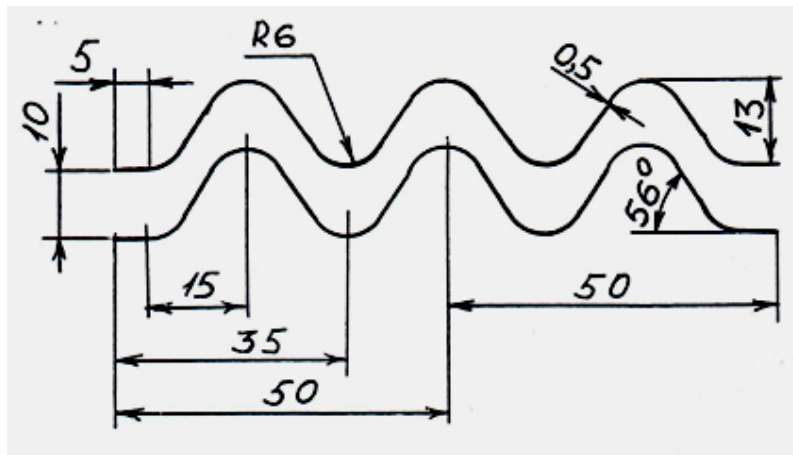
Диаметр колонки выбирался из условия  $d_k \geq d_{пр}$ , где  $d_{пр}$  – предельное значение диаметра испарителя, выше которого стенки аппарата уже не оказывают влияние на гидродинамику барботажного слоя. Меньшие значения  $d_k$  искажают

величину действительного уровня барботажного слоя  $h_{дейст}$  из-за увеличения его объемного паросодержания. Полученные в этом случае результаты не могут отражать процессы капельного уноса и паросепарации в реальных аппаратах.

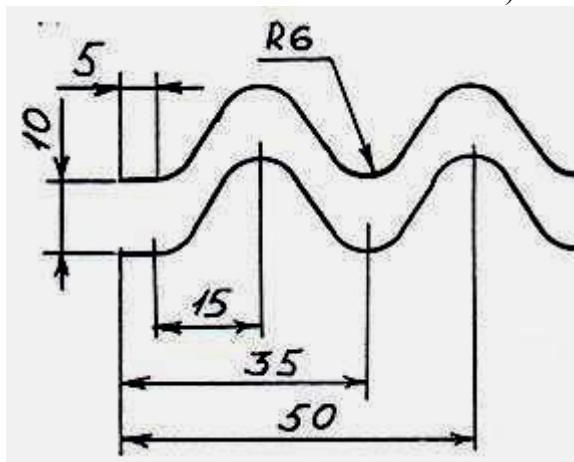
Величина  $d_{пр}$  определялась по формуле [6]:

$$d_{пр} = 260 \cdot \left( \frac{\rho'}{\rho' - \rho''} \right)^{0,2} \cdot \left( \frac{\sigma}{g \cdot (\rho' - \rho'')} \right)^{0,5} \quad (4)$$

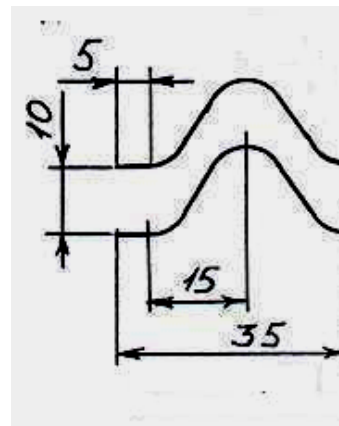
Величина  $d_{пр}$ , рассчитанная по формуле (4), для абсолютного давления 0,0199 МПа составляет 0,11 м. Значения предельного диаметра оказываются значительно ниже принятого диаметра корпуса испарителя, который по технологическим причинам имел квадратное сечение  $0,230 \times 0,230$  м.



а)  $n = 6$



б)  $n = 4$



в)  $n = 2$

Рис. 2. Профили криволинейного канала испытываемых горизонтальных жалюзийных сепараторов с различным числом полуволн  
 Fig. 2. Profiles of the curved channel of the tested horizontal louver separators with different number of half waves

Принятые размеры поперечного сечения испарителя были близки к размерам камеры испарения экспериментального стенда кипящего опреснителя в работе [3], что позволяло производить сопоставление данных, полученных ранее, с нашими результатами при принятых одинаковых методиках измерения влажности пара до и после исследуемых сепараторов.

Для исключения влияния неравномерного распределения выхода пара из барботажного слоя на величину капельного уноса все эксперименты проводились с погруженным дырчатым щитом (ПДЩ), который устанавливался в испарителе. Диаметр отверстий в щите  $d = 5$  мм. «Живое сечение» дырчатого щита (количество отверстий) выбиралось из условия обеспечения устойчивого существования паровой подушки под листом и составляло  $\varphi_{отв} = 5,7\%$ .

Действительный (физический) уровень воды в испарителе над ПДЩ контролировался по иллюминатору. Расстояние от «зеркала испарения» до ПДЩ составляло:  $h_{дейст} = 180$  мм. Весовой уровень над погруженным дырчатым листом изменялся в пределах  $h_{вес} = (70 \div 100)$  мм, а его величина – по водоуказательному стеклу.

Исследуемые горизонтальные жалюзийные сепараторы собирались из штампованных пластин, изготовленных из меди или нержавеющей стали, и устанавливались на расстоянии 0,435 м от действительного уровня воды в испарителе. Профили криволинейного канала сепараторов с числом ступеней сепарации (числом полуволн)  $n = 2; 4; 6$  приведены на рис. 2. Профиль «а» с числом полуволн  $n = 6$  стандартный. Он широко применяется для очистки пара в паровых котлах и испарителях и был выбран для сравнения наших результатов с данными, полученными другими авторами [4, 5]. Сепараторы с профилем криволинейного канала «б» и «в» отличались от профиля «а» только количеством полуволн. Остальные геометрические характеристики для всех трёх профилей были одинаковы.

Кроме жалюзийного каплеуловителя с традиционным криволинейным профилем канала объектом исследований стал также сепаратор с поперечным сечением  $100 \times 100$  мм, состоящий из прямых параллельных пластин толщиной 0,5 мм, установленных по схеме работы ГЖС под углом к горизонтали  $\beta = 84^\circ$ , с перекрышей  $C = 10$  мм.

Сепаратор такой конструкции состоит из прямолинейных каналов прямоугольного сечения. Исключив влияние на эффективность процесса осаждения капель геометрических параметров криволинейного профиля  $R$  и  $\alpha$ , можно определить, во сколько раз снижается величина  $\omega_k$  после одной ступени сепарации влаги, и сделать вывод о выборе минимально необходимого количества полуволн для горизонтального жалюзийного сепаратора. Результаты экспериментальных исследований эффективности этого каплеуловителя позволяют также установить, как влияет  $n$  на критическую скорость пара в сепараторе  $W''_{кр}$ .

Генерируемый в испарителе пар проходил очистку в горизонтальном сепараторе и далее через поворот с радиусом 100 мм и соединительный патрубок  $D_y 50$  поступал в змеевиковый конденсатор. Конденсация пара происходила на поверхности восьми параллельно подключенных змеевиков, которые изготавливались из цельнотянутых трубок с наружным диаметром 12 мм. Входы и выходы змеевиков подключались к входному и выходному коллекторам охлаждающей воды через сальниковые уплотнения с резиновыми прокладками в корпусе кон-

денсатора, а все сварные соединения змеевиков были выведены из его внутренней полости.

Такая конструкция конденсатора полностью исключала попадание примесей вместе с охлаждающей водой в полость конденсатора, что особенно важно для выбранной методики измерения влажности пара. Уровень конденсата в конденсаторе контролировался по водоуказательному стеклу. Площадь поверхности охлаждения конденсатора составляла  $0,603 \text{ м}^2$ .

После полного прогрева экспериментальная установка работала в автоматическом режиме, так как весь конденсат из конденсатора перепускался назад в испаритель, обеспечивая тем самым постоянный действительный уровень и содержание испаряемого рассола. Подпитка испарителя производилась дистиллятом из отдельной емкости. Все основные узлы изготовлены из стали ОХ18Н10Т. Для уменьшения конденсации пара на стенках стенда и предотвращения ожогов обслуживающего персонала стенд имел асбестовую изоляцию.

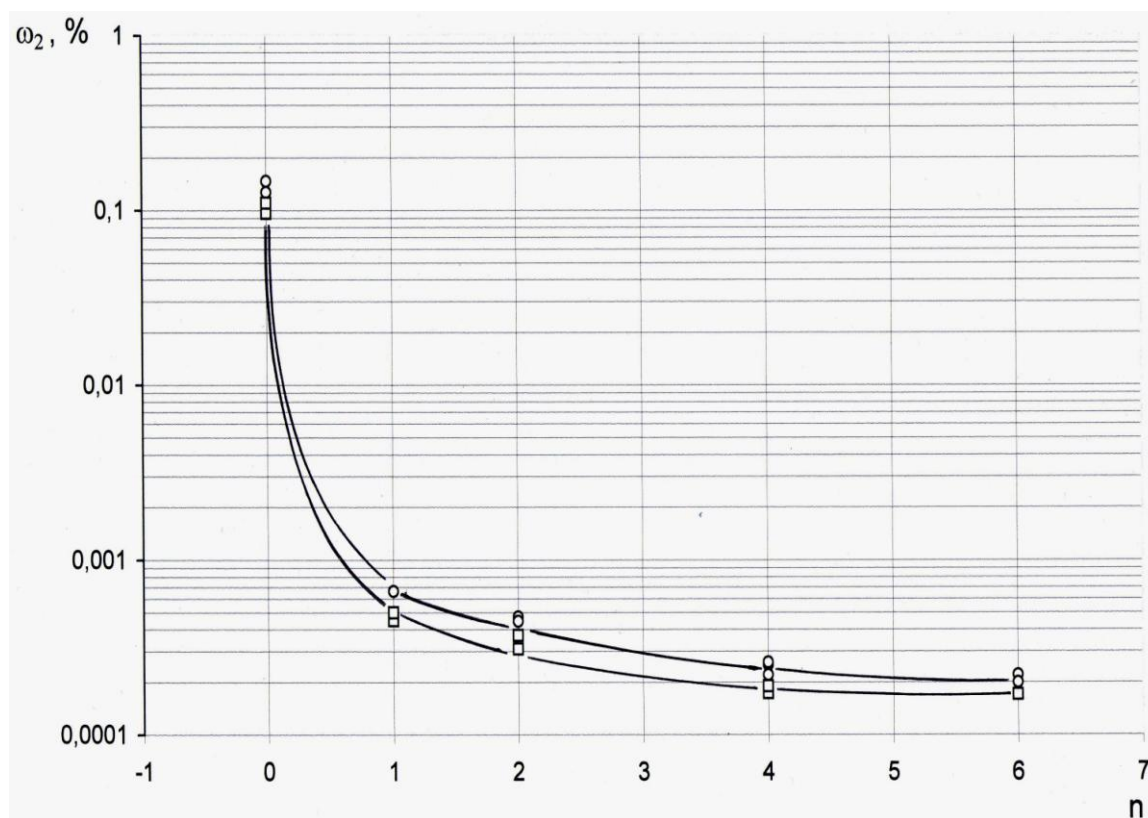


Рис. 3. Влажность пара после горизонтальных сепараторов в зависимости от числа полуволн в пластинах жалюзи при  $P = 0,0199 \text{ МПа}$ ,  $W_o'' = 1,6 \text{ м/с}$ ,  $\varphi_{омв} = 5,7 \%$

□ –  $W_c'' = 21 \text{ м/с}$ ; ○ –  $W_c'' = 14 \text{ м/с}$

□ –  $\omega_{и}$ ,  $H_{по} = 0,25 \text{ м}$ ; △ –  $\omega_{п}$ ,  $H_{по} = 0,45 \text{ м}$ ; ● –  $\omega_{с}$ ,  $H_{по} = 0,65 \text{ м}$

Fig. 3. Moisture vapor after horizontal separators according to the number of half-waves in plates blinds at  $P = 0,0199 \text{ МПа}$ ,  $W_o'' = 1,6 \text{ м/с}$ ,  $\varphi_{омв} = 5,7 \%$

□ –  $\omega_{и}$ ,  $H_{по} = 0,25 \text{ м}$ ; △ –  $\omega_{п}$ ,  $H_{по} = 0,45 \text{ м}$ ; ● –  $\omega_{с}$ ,  $H_{по} = 0,65 \text{ м}$

□ –  $W_c'' = 21 \text{ м/с}$ ; ○ –  $W_c'' = 14 \text{ м/с}$

Подробное описание конструкции остальных узлов экспериментального стенда и методики измерения капельного уноса приводится в [8, 9].

На рис. 3 представлены результаты замеров влажности пара после горизонтальных сепараторов  $\omega_2 = \omega_c$  с различным числом полувольт в пластинах ( $n = 2; 4; 6$ ) при скоростях пара в сепараторе 14 и 21 м/с. Опыты проводились на воде солёностью  $(20 \div 30) \cdot 10^3$  мг/л NaCl при  $P = 0,0199$  МПа, приведенной скорости пара в испарителе  $W''_o = 1,6$  м/с и живом сечении дырчатого листа  $\varphi_{отв} = 5,7$  %.

На этом же рисунке при  $n = 0$  показаны значения влажности пара на входе в испытываемые сепараторы  $\omega_1 = \omega_n$ , а также значения  $\omega_2$  после горизонтально-го пакета плоских параллельных пластин с перекрытием 10 мм и  $n = 1$ .

Влажность пара перед сепараторами составляла  $\omega_n = (0,096 \div 0,154)$  %. Как видно из рис. 3, наиболее значительное снижение влажности пара происходит уже после первой ступени сепарации капель ( $n = 1$ ). Коэффициент очистки пара в горизонтальном пакете плоских параллельных пластин с перекрытием 10 мм составлял около 190 и 220 при скоростях пара в сепараторе  $W''_c = 14$  и 21 м/с соответственно.

Во время испытаний профиля «в» ( $n = 2$ ) (см. рис. 2) коэффициент очистки пара увеличивался до 260 при  $W''_c = 14$  м/с и 330 при  $W''_c = 21$  м/с. Увеличение числа полувольт в пластинах жалюзи от четырёх до шести (профили «б» и «в», см. рис. 2) практически не влияло на значения влажности пара после сепаратора. Значения  $K_{Oч}$  увеличивались с 590 при  $W''_c = 14$  м/с и 670 при  $W''_c = 21$  м/с до 630 и 720 соответственно.

Это согласуется с результатами экспериментальных исследований ГЖС, проведённых в МЭИ на избыточных давлениях, в которых увеличение числа полувольт в пластинах жалюзи более двух не влияло на влажность пара после сепаратора [4, 5].

На рис. 4 показаны зависимости влажности пара после сепаратора  $\omega_2 = \omega_c$  от скорости  $W''_c$  для горизонтального пакета плоских параллельных пластин с перекрытием ( $n = 1$ ), а также для жалюзийных сепараторов с профилями криволинейного канала «в» ( $n = 2$ ) и «б» ( $n = 4$ ). Исследования проводились на солёной воде, при постоянной приведенной скорости пара  $W''_o = 1,6$  м/с. Значения скорости пара в самом сепараторе  $W''_c$  изменялись за счет уменьшения прохода пара в поворот, что достигалось перекрытием входного сечения сепаратора. Степень перекрытия входного сечения сепаратора составляла  $f_o/f' = (1,8 \div 8,0)$ . При этом значения влажности пара на входе в ГЖС –  $\omega_n$  – снижалось не более чем в 1,77 раза из-за осаждения незначительного количества влаги на пороге, перекрывающем входное сечение.

Из рис. 4 видно, что с увеличением скорости пара в сепараторе  $W''_c$  до некоторой критической скорости пара  $W''_{кр}$  значения конечной влажности после всех исследуемых сепараторов снижались. При достижении  $W''_c = W''_{кр}$  происходил срыв плёнки уловленной влаги с поверхности пластин жалюзи, сопровождающийся увеличением влажности после сепаратора.

Начало кризиса в горизонтальных каплеуловителях на вакууме сопровождалось резким увеличением влажности  $\omega_c$  после поворота на входе в сепарационную камеру и одновременным ростом солености проб дистиллята, отбираемых из конденсатора.

Эксперименты показали, что работа жалюзийных сепараторов на этой стадии отличается неустойчивостью. Колебания действительного уровня рассола в испарителе в пределах  $\pm 20$  мм приводили к резким скачкам конечной влажности пара.

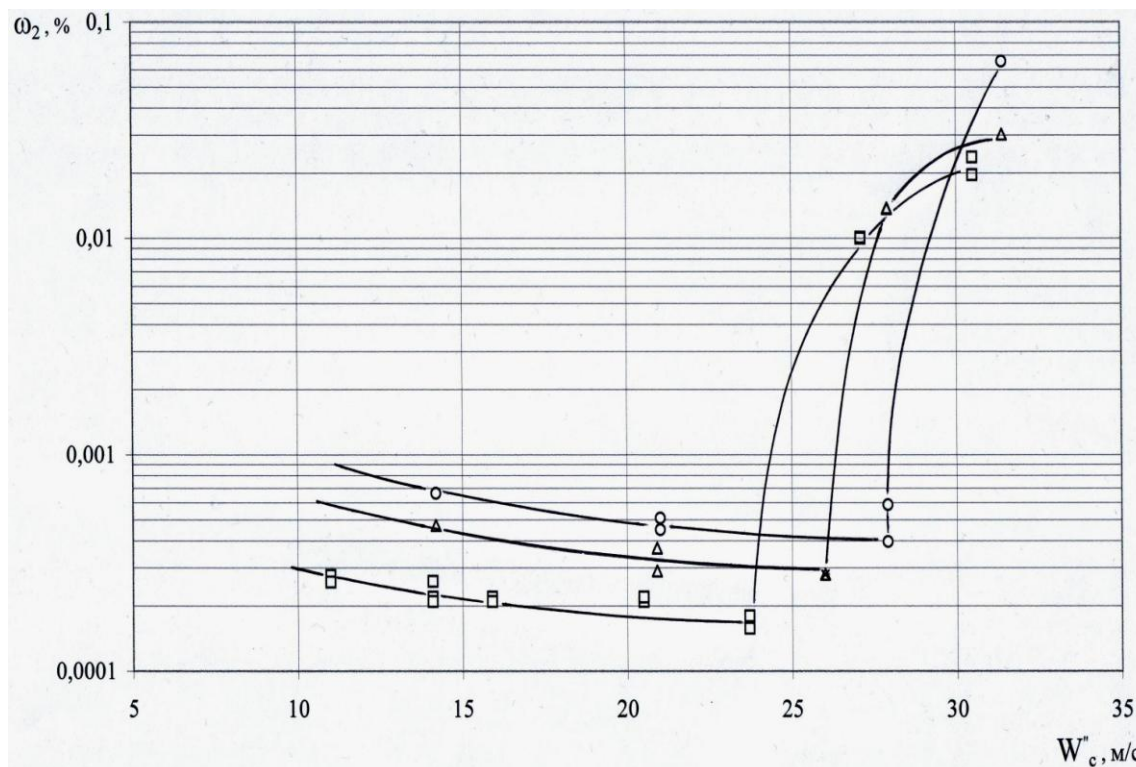


Рис. 4. Влажность пара после горизонтальных сепараторов различного типа в зависимости от скорости пара в сепараторе при  $P = 0,0199$  МПа,  $W''_o = 1,6$  м/с,  $\varphi_{омв} = 5,7$  %

○ - n = 1; △ - n = 2; □ - n = 4

Fig. 4. Moisture vapor after horizontal separators of different types, depending on the steam velocity in a separator at  $P = 0.0199$  МПа,  $W''_o = 1,6$  m / s,  $\varphi_{омв} = 5,7$  %

○ - n = 1; △ - n = 2; □ - n = 4

При одинаковых режимных условиях (давлении пара, начальной влажности, скорости  $W''_o$ ) значения критической скорости пара в сепараторе  $W''_{кр}$ , при которой происходит резкое ухудшение качества пара, несколько снижались с увеличением числа ступеней сепарации n. Полученный результат можно объяснить тем, что при высокой начальной влажности дренаж сепаратора с пластин горизонтальных жалюзи всегда осуществляется неэффективным, неорганизованным способом – навстречу входящему потоку пара.

С увеличением  $n$  растёт эффективность очистки пара в сепараторе, что приводит к увеличению толщины плёнки уловленной влаги, уменьшению сечения для прохода пара и снижению  $W_{кр}''$ . Полученные результаты подтверждают исследование ГЖС с профилем канала «а» и  $n = 6$  (см. рис. 2). Эффективность этого сепаратора практически не отличалась от ГЖС с профилем канала «б» ( $n = 4$ , см. рис. 2), поэтому значения критической скорости пара обоих сепараторов оказались близкими.

### ВЫВОДЫ

Результаты проведённых исследований при  $P = 0,0199$  МПа показали, что увеличение числа полуволн в пластинах горизонтального жалюзийного сепаратора свыше четырёх при значениях  $\omega_l \leq 1,0$  % практически не влияет на снижение конечной влажности пара после сепаратора. Критическая скорость пара в горизонтальном сепараторе с увеличением числа полуволн в пластинах снижается.

Следует отметить, что критическая скорость зависит от влажности пара на входе в сепаратор, поэтому является целесообразным проведение дальнейших исследований эффективности работы ГЖС с различным числом полуволн в пластинах при более высоких значениях влажности набегающего потока пара.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мошкарин, А.В. Испарительные установки тепловых электростанций / А.В. Мошкарин, Р.Ш. Бускунов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 272 с.
2. Мошкарин, А.А. Совершенствование схем испарительных установок ТЭС: автореф. дисс... канд. техн. наук / А.А. Мошкарин. – Иваново: Иван. гос. энергет. ун-т, 2006. – 24 с.
3. Тихонов, В.М. Экспериментальное исследование уноса и сепарации капель в вакуумных опреснителях: автореф. дисс... канд. техн. наук / В.М. Тихонов. – М., 1978. – 18 с.
4. Девянин, В.А. Выбор оптимальных условий работы жалюзийных сепараторов для парогенерирующих установок ТЭС и АЭС: автореф. дисс... канд. техн. наук / В.А. Девянин. – М., 1985. – 20 с.
5. Рафаелян, А.В. Повышение эффективности сепарирующих устройств аппаратов барботажного типа ТЭС и АЭС: автореф. дисс... канд. техн. наук / А.В. Рафаелян. – М., 1989. – 18 с.
6. Кутепов, А.М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А.М. Кутепов, Л.С. Стерман, Н.Г. Стюшин. – М.: Высш. шк., 1986. – 448 с.
7. Филонов, А.Г. Влияние режимных и конструктивных параметров сепараторов судовых опреснителей на эффективность процессов тонкой очистки пара: автореф. дисс... канд. техн. наук / А.Г. Филонов. – Калининград, 2000. – 22 с.
8. Филонов, А.Г. Экспериментальное исследование влияния солесодержания испаряемой воды на влажность пара при барботажном кипении // Известия КГТУ. – 2011. – № 21. – С. 121-126.



9. Филонов, А.Г. Об эффективности работы погруженного парораспределительного щита при барботажном кипении / А.Г. Филонов // Известия КГТУ. – 2012. – № 25. – С. 185-191.

## RESEARCH OF EFFICIENCY OF THE HORIZONTAL STEAM SEPARATOR WITH THE DIFFERENT NUMBER OF HALF WAVES IN PLATES

A.G. Filonov, V.S. Yurkov

The article describes a technique for experimental studies of efficiency of horizontal louver separators with different numbers of half-waves in plates with barbotage evaporation of salt water and the vapor pressure of 0,0199 MPa. The analysis of the experimental data.

*horizontal louver separator, the critical steam velocity, barbotage boiling, moisture vapor, salinity, droplet entrainment, salinity, phisical water level, desalination plant*