

УДК 538.248.2

Двухфазные потоки в вытяжных трубах растворителя плава СРК

Л. В. Романова, Т. Л. Филиппова,
СПб ГТУ РП

Локальные источники парогазовых выбросов целлюлозно-бумажных предприятий (ЦБП), которые по условиям технологии соединены с атмосферой вытяжными трубами высотой 40–50 м, являются причиной возникновения ряда негативных факторов: загрязнения атмосферного воздуха; убытков предприятия вследствие потери тепла и химикатов; разрушения внешних стен и кровли производственных зданий и сооружений за счет агрессивного влияния выбрасываемых парогазовых смесей. Для ликвидации этих факторов необходимо решить ряд задач: охлаждение парогазовых выбросов с регенерацией тепла; удаление из потока капельной влаги извлечение и возврат в цикл производства химических компонентов выбросов [1].

Для решения этой комплексной задачи, в ОНИЛ СПб ГТУ РП были разработаны конденсационный метод очистки промышленных выбросов и аппарат для осуществления этого метода (газоочистный конденсатор), который устанавливают непосредственно на локальном источнике и соединяют с атмосферой вытяжной трубой. В ходе исследований эффективности работы газоочистного конденсатора была выявлена возможность использования вытяжных труб в качестве пленочных

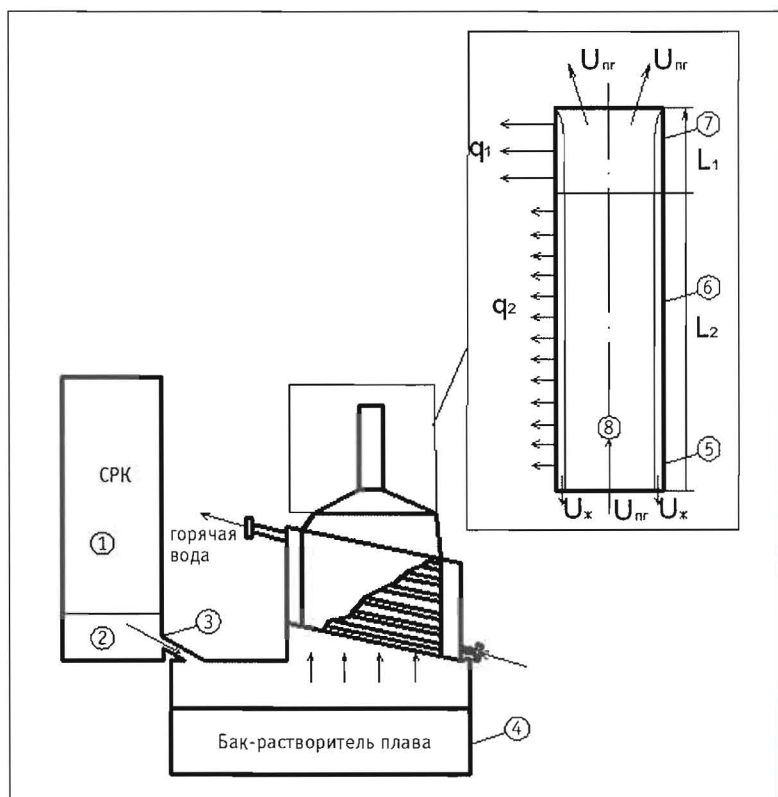


Рис. 1. Принципиальная схема растворения плава:
1 – содорегенерационный котлоагрегат; 2 – плава; 3 – летка; 4 – гребенка с острым паром для дробления струи плава; 5 – капли плава; 6 – бак-растворитель плава; 7 – газоочистный конденсатор; 8 – нижняя часть вытяжной трубы.

абсорберов. Модификация (или изменение конфигурации) нижней части вытяжной трубы [2] позволило исполь-

зовать вытяжную трубу как вторую ступень очистки парогазовых выбросов растворителя плава.

Основные параметры парогазового потока внутри вытяжной трубы

d, м	T _{пгр} , °C	G×10 ⁻³ , м ³ /ч	U _{пгр} , м/с	X _в , %	m×10 ³ , кг/с	T, °C
1	2	3	4	5	6	7
0,6	85	13,8	13,7	30	0,53	0
0,6	75	11,2	11,1	30	0,39	-7
0,6	125	6,7	6,6	45	0,28	+27
1,0	100	18	6,4	25	1,2	0
1,0	90	18	6,4	14	0,83	-25
1,0	125	18	6,4	30	1,1	+25

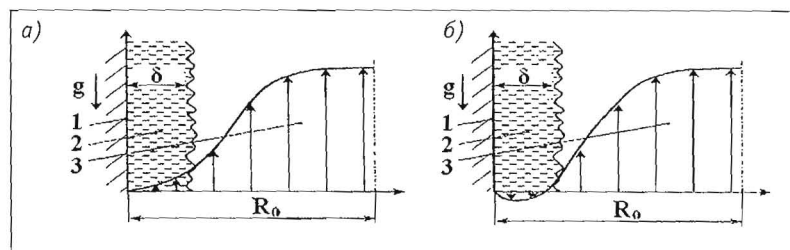


Рис. 2. Профили скорости в пленке и парогазовом потоке:

а – режим инверсии; б – режим захлебывания.

1 – стенка трубы; 2 – пленка конденсата; 3 – парогазовый поток; R_0 – радиус трубы; δ – толщина пленки.

дела пар-пленка. $Bo = \frac{D}{\sqrt{\frac{\sigma}{(\rho' - \rho'')g}}}$ – число Бонда.

Согласно литературным данным, режиму захлебывания предшествуют несколько критических явлений: начало каплеуноса ($U_{пг} \approx 0,5U_{кр}$); подвигание пленки жидкости ($U_{пг} \approx 0,75U_{кр}$); частичный выброс жидкости в ядро потока ($U_{пг} \approx 0,9U_{кр}$); режим захлебывания ($U_{пг} \approx U_{кр}$). Для ламинарного течения пленки скорость пленки на границе раздела пар-пленка может быть определена по зависимости Нуссельта [6]:

$$U' = 1,5 \left(\frac{g\nu}{3} \right)^{1/3} Re^{2/3} \quad (3)$$

Здесь $Re = \frac{\bar{U} \cdot \delta}{\nu} = \frac{qL}{\mu\Gamma}$ – число Рейнольдса пленки конденсата внутри вытяжной трубы; $q \left[\frac{Вт}{м^2} \right]$ – удельный тепловой поток при конденсации пара.

Диффузионное сопротивление при конденсации паровоздушной смеси является определяющим. При концентрации воздуха в паре более 5 %, относительный коэффициент теплоотдачи при изменении концентрации воздуха изменяется очень слабо.

Вычисление коэффициента теплоотдачи при конденсации чистого водяного пара на вертикальной поверхности по [6]:

$$Nu^* = Nu_i^* \frac{Re^*}{Re} + Nu_v^* \frac{Re_{sp} - Re^*}{Re} \quad (4)$$

Определение коэффициента теплоотдачи при конденсации парогазовой смеси внутри вытяжной трубы выполняем по [7].

Определение среднелогарифмического температурного напора при охлаждении трубы воздухом показано на рис. 3 (б), а при охлаждении пленкой воды – на рис. 3 (в).

Основные параметры парогазовых потоков внутри трубы, полученные на разных комбинатах, приведены в таблице.

Вытяжные трубы, изготавливающиеся из нержавеющей стали с толщиной стенки 5 – 6 мм, выступают над кровлей здания на высоту 5 – 6 метров. Рассматриваемая нами вытяжная труба является устройством, в котором парогазовый поток движется вверх, а конденсированная жидкость движется по стенкам трубы вниз. Известно, что при встречном течении потоков существуют режимы захлебывания до полной инверсии течения пленки [4]. Выброс влаги в вертикальной вытяжной трубе достигает примерно 30 – 50 % от ее полного расхода в пленке. Схематично оба режима можно представить так, как показано на рис. 2.

При режиме инверсии скорость пара и пленки имеют одно направление, противоположное силе тяжести. При режиме захлебывания основная масса жидкости стекает вниз и только на границе раздела пар-пленка часть жидкости движется под действием трения вверх. В работе [5] приводится карта режимов течения двухфазных потоков подобного типа в координатах:

$$We = f(N) \quad (1)$$

$$\text{Здесь } We = \frac{U_{пг} \sqrt{\rho_{пг}}}{\sqrt[4]{\sigma g (\rho' - \rho'')}} -$$

критерий Вебера.

$We_{кр}$ – критическое значение критерия Вебера, при котором имеет место режим захлебывания. $U_{пг} = U_{кр}$ – скорость парогазового потока, при котором возникает режим захлебывания. При определении числа We принимается значение скорости потока на срезе трубы.

$$N = \frac{U' \sigma^{1/2}}{gD^{3/2} (\rho' - \rho'')^{1/2}} = \frac{\sqrt{Fr'}}{Bo} \quad (2)$$

Что такое N ??

$Fr' = \frac{U'^2}{gD}$ – число Фруда, построенное по скорости жидкости на границе раз-

Теплообмен при поперечном обтекании трубы потоком воздуха со скоростью U можно вычислить по зависимости [8]:

$$Nu = 0,3 + \sqrt{Nu_{\varepsilon}^2 + Nu_{\delta}^2}, \quad (6)$$

$$\text{где } Nu = \frac{0,037 Re^{0,8} Pr}{1 + 2,443 Re^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)}. \quad (7)$$

Зависимость (7) описывает теплообмен при турбулентном пограничном слое

$$Nu_{\varepsilon} = 0,664 \sqrt{Re_{\varepsilon}} \sqrt{Pr}. \quad (8)$$

Зависимость (8) описывает теплообмен при ламинарном пограничном слое. Зависимость (6) справедлива при $1 \leq Re \leq 10^7$ и $0,5 \leq Pr \leq 2000$; зависимость (7) справедлива при $10^5 \leq Re \leq 10^7$, а зависимость (8) – при $Re \leq 10^5$. Здесь $Re = \frac{U \cdot l}{\nu}$, где $l = \frac{\pi D}{\nu}$ – линейный размер при определении чисел Re и Nu , $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ – число Нуссельта.

В нижнюю часть трубы поступает пленка, образовавшаяся по всей длине трубы, таким образом число Рейнольдса пленки исчисляется по полной плотности орошения

$$G = G_1 + G_2 \left[\frac{\kappa \gamma}{m \cdot \text{сек}} \right]. \quad (9)$$

Здесь $G_1 = \frac{q_1 L_1}{r} \left[\frac{\text{кг}}{m \cdot \text{сек}} \right]$ – плотности орошения трубы над кровлей здания,

$G_2 = \frac{q_2 L_2}{r} \left[\frac{\text{кг}}{m \cdot \text{сек}} \right]$ – плотности орошения трубы под кровлей здания.

Внутри здания труба охлаждается воздухом за счет естественной и вынужденной конвекции. Скорость воздуха при вынужденной конвекции можно принять равной 0,5 м/с.

При естественной циркуляции в [8] теплообмен рекомендуется рассчитывать по зависимости:

$$Nu = 0,67 (Ra_L \Phi(Pr))^{1/4}, \quad (10)$$

$$\text{где } \Phi(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,437}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9},$$

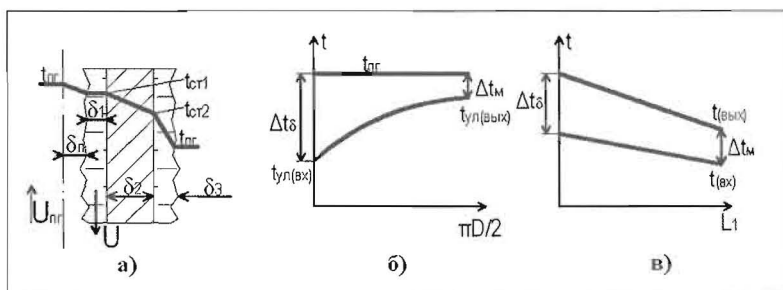


Рис. 3. Расчет теплопередачи в трубе: а – температурное поле парогазовый поток – охлаждающая среда (воздух или пленка дождя); δ₁ [м] – толщина пленки конденсата; δ₂ [м] – толщина стенки вытяжной трубы; δ₃ [м] – толщина диффузионного пограничного слоя; δ₄ [м] – толщина дождевой пленки; б – изменение температур парогазового потока и воздуха при охлаждении трубы воздухом (поперечное обтекание); t_{gr} (вх) – температура воздуха на улице; t_{gr} (вых) – средняя температура воздуха внутри пограничного слоя, после его нагрева от вытяжной трубы; t_{gr} = const – температура парогазового потока; в – изменение температуры насыщения пленки конденсата (при переменном парциальном давлении пара) и пленки охлаждающей воды по высоте трубы. Отсчет координат ведется от кровли здания.

$$Ra_L = \frac{g \rho C_p \beta (T_w - T_{\infty}) L_2^3}{\lambda \cdot \nu} - \text{число Рейля},$$

L_2 – высота трубы в цехе, $\beta = \frac{1}{T_0}$ – коэффициент объемного расширения воздуха.

Интегральный эффект теплоотдачи от трубы к воздуху вычисляется по [8] как:

$$Nu^3 = \dot{A}_F Re^{1/2} Pr^{1/3} f_r(Pr)^3 + [A_N (Ra_N(Pr))^{1/4}]^3 \quad (11)$$

Для турбулентного режима можно использовать соотношение:

$$Nu = \frac{0,15 Ra^{1/3}}{[1 + (0,322/Pr)^{0,55}]^{0,6}}, \quad (12)$$

где $l = \frac{\pi D}{2}$ – характерный линейный размер;

$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$ – число Прандтля воздуха при температуре воздуха в цехе;

$$f_r(Pr) = [1 + (\tilde{N}_F / Pr)^{2/3}]^{1/4};$$

$$f_N(Pr) = [1 + (\tilde{N}_N / Pr)^{9/16}]^{16/9}.$$

При $q = \text{const}$ $A_F = 0,464$; $A_N = 0,563$; $C_F = 0,0205$; $C_N = 0,437$.

Концентрация воздуха в паровоздушном потоке, температуры и расхода ПГС позволяет вычислить критерий Вебера и комплексный параметр N , характеризующий гидродинамические режимы двухфазного потока в вытяжной трубе [9].

Критерий Вебера и комплексный критерий N характеризуют количество щелочной влаги, пыли и серосодержащих примесей, выбрасываемых в атмосферу.

Список литературы

1. Лендьял П., Морваи Ш. Химия и технология целлюлозно-бумажного производства. – М.: Лесная промышленность, 1989.

2. Патент РФ № 2190714. Устройство для регенерации тепла и химикатов из парогазовых выбросов растворителя плава сорегенерационного агрегата сульфатцеллюлозного производства // Романова Л.В., Суслов В.А., Акимов И.В., Гогонин И.И. Оpubл. 10.10.02

3. Романова Л. В., Гогонин И. И. Очистка выбросов с помощью конденсатора. Теплоэнергетика, 1997, № 7, с. 57-61.

4. Бойков Л. М. Исследование процессов взаимодействия воды с плавом сульфатного щелока как возможной причины топочных взрывов: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Л., 1971.

5. Сорокин Ю. Л., Кирдяшин А. Г., Покусаев Б. П. Исследование устойчи-

вости пленочного режима течения жидкости в вертикальной трубе при восходящем движении газа: Химическое и нефтяное машиностроение. — 1965. — № 5, с. 35-38.

6. Тананайко Ю. М., Воронцов Е. Г. Методы расчета и исследования пленочных процессов. — Киев: Техника, 1975.

7. Брдлик П. М. Конденсация пара из неподвижных газовых смесей //

ИФЖ. — 1959. Т. 2. № 3. с. 3-8.

8. Справочник по теплообменникам / пер. с англ.; Под ред. Петухова Б. С., Шикова Б. К. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — Т. 1. с. 560.

9. Гогонин И. И., Романова Л. В. Анализ режимов двухфазного потока вытяжной парогазовой трубы // Теплофизика и аэромеханика. 1999. № 4. — с. 555-559.

Две бутылки и бокал

Компания «Smurfit Kappa UK» выиграла конкурс «Гофрированная упаковка года» 2011 UK Packaging Awards. Завоевать престижную награду ему помог структурный дизайн коробки **Wrong Way Box** для эля **Old Tom**, который заменил неэффективную и дорогую деревянную упаковку. Компания была выб-

рана из целого ряда сильных соперников. Она обошла такие известные в данной области фирмы, как **DS Smith** и **SAICA**. Один из судей описал подарочную упаковку, в которой находятся две бутылки с элем и бокал, как очень оригинальную и оценил ее «рациональный контурный дизайн, который позволяет

использовать каждый кусочек упаковки».

Это уже вторая награда, полученная компанией Smurfit Kappa за подарочную упаковку **Old Tom**. До этого она удостоилась золотой медали на престижном конкурсе **European Flexographic Industry Association Awards**.

Upakovano.ru

Его знали все...

Ушел из жизни **В. П. Петров**, один из наиболее авторитетных специалистов ЦБП в сфере автоматизации производства.

Виталий Петрович Петров родился 1 июня 1934 года в маленьком городке Змеиногорске Алтайского края. Детство его пришлось на военные годы, было тяжелым и голодным, но даже тогда маленький Виталий читал все книги, что удавалось найти, был любознательным и открытым для знаний.

В 1952 году он приехал в Ленинград, где поступил в престижнейший в те годы **ЛЭТИ**. Закончив институт и аспирантуру, он был зачислен во **ВНИИБ** (Научно-исследовательский институт бумажной промышленности), где прошел путь от старшего инженера до заведующего отделом автоматики.

Всего в жизни Виталий Петрович достиг только собственным умом и талантом, трудом и доброжелательным отношением к людям.



Будучи кандидатом наук, он стал автором 40 авторских изобретений и 28 из них было внедрено. Виталий Петрович воспитал более 15 аспирантов, у него есть множество публикаций научных работ в России и за рубежом, издано несколько книг под его авторством.

В российской ЦБП Виталий Петрович известен как ученый, исследователь, прекрасный руководитель и человек.

С 1990-х годов, после развала СССР, В. В. Петров продолжил свою работу в сфере автоматизации производства, но не в государственных, а в частных структурах.

Более 15-ти лет Виталий Петрович был консультантом финской фирмы **Metso**, и работал в этой компании до самого последнего времени. Ум его, несмотря на тяжелую болезнь, оставался ясен и остр до последнего вздоха.

Своей добротой, отзывчивостью, честностью, прекрасным чувством юмора, разносторонней образованностью Виталий Петрович заслужил любовь в сердцах знавших его людей.

Друзья, коллеги и близкие Виталия Петровича, его жена, дети, внуки и подрастающие правнуки понесли тяжелую утрату. Память о В. В. Петрове останется в наших сердцах.

Друзья и коллеги