

УДК 538.248.2

АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ВЫТЯЖНОЙ ПАРОГАЗОВОЙ ТРУБЫ

И.И. ГОГОНИН

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Л.В. РОМАНОВА

Университет растительных полимеров, С.-Петербург

Показано, что при охлаждении вытяжной трубы дождем или снегом труба работает в режиме захлебывания, а при охлаждении ветром со скоростью 10 м/с и более имеет место интенсивный брызгонос скопированной жидкости парогазовым потоком. Предлагается способ, позволяющий снижать скорость парогазового потока внутри трубы в 3 – 5 раз, а также очищать парогазовые выбросы от пыли, влаги и серосодержащих до санитарных норм.

Вытяжные трубы, по которым отводятся парогазовые смеси с различным составом газов и концентрацией пара, используются на предприятиях химической, целлюлозно-бумажной, пищевой и других отраслей промышленности. Вытяжная труба с парогазовым потоком является обязательным элементом любой технологической установки для сжигания бытового мусора. Парогазовые выбросы, как правило, содержат пылевые частицы, щелочную или кислотную влагу, а также серосодержащие примеси.

Задача данного исследования — анализ режимов течения двухфазных потоков, которые создаются за счет частичной конденсации пара на стенках металлических вытяжных труб. Исключение выбросов пыли, щелочной (или кислотной) влаги, а также серосодержащих является одной из актуальнейших задач, которые в настоящее время стоят перед многими промышленными предприятиями.

Проанализируем работу вытяжной трубы на примере некоторых предприятий целлюлозно-бумажной промышленности.

Сульфатный способ варки целлюлозы является крупным источником газопылевых выбросов. До 80 % загрязняющих выбросов приходится на содо-регенерационный котел и его технологический узел — бак-растворитель плава [1 – 3]. Процесс растворения плава (солей натрия), температура которого часто превышает 900 °С, происходит в растворе щелока с температурой 60 – 70 °С и сопровождается микро- и макровзрывами [4 – 6]. Для уменьшения мощности тепловых взрывов плава при истечении из летки дробится острым паром и щелоком, струи которого на выходе из кольцевой гребенки направлены внутрь кольца [2, 3, 7]. В результате контакта плава и холодного щелока возникает дополнительное количество пара, который удаляется в атмосферу через вытяжные трубы. Влажный пар содержит щелочные капли, до 2 % пылевых частиц (в основном карбоната натрия), от 5 до 45 % воздуха, а также сероводород и сернистый ангидрид в количестве около $5 \cdot 10^{-3}$ % каждого. Удаление паровоздушных выбросов в атмосферу приводит к потерям химикатов и большого количества тепла, так как их температура колеблется от 85

до 125 °С. В среднем количество выбросов из растворителя плава составляет 226 м³ на каждую тонну вырабатываемой целлюлозы.

Вытяжные трубы изготавливаются из нержавеющей стали с толщиной стенки 5 – 6 мм, имеют общую высоту 40 – 60 м и выступают над кровлей здания на высоту 5 – 6 м. Такая труба является конденсатором вертикального типа. Интенсивность теплопередачи и толщина пленки в этом конденсаторе практически полностью определяются условиями отвода тепла на внешней поверхности трубы. Условно такой конденсатор можно разделить на две неравные части. Механизм охлаждения части трубы, расположенной над кровлей здания, зависит от погодных условий: естественная конвекция в ясную погоду и пленочное охлаждение при выпадении дождя или снега. Нижняя (большая) часть трубы находится под кровлей здания, всегда охлаждается воздухом при смешанной (естественной и вынужденной) конвекции. Вынужденная конвекция возникает в цехе из-за работы вытяжной и приточной вентиляции.

Процесс движения парогазового потока в трубе происходит за счет самотяги, и, следовательно, с большой точностью тепломассообмен в трубе можно считать протекающим при условии $P = \text{const}$. Объемный расход парогазового потока по высоте трубы уменьшается за счет частичной конденсации пара и за счет охлаждения паровоздушного потока и увеличения плотности воздуха. Однако расчеты показывают, что изменение этих параметров в нижней части трубы не превышает 2 % и им можно пренебречь. По мере конденсации пара в трубе его парциальное давление падает. При этом могут возникнуть условия, когда температура стенки внутри трубы приблизится к температуре насыщения при данном парциальном давлении. Процесс конденсации практически прекратится. Определить температуру стенки и температуру насыщения при данном парциальном давлении можно путем решения задачи о теплопередаче для заданных исходных условий. Если на улице сухо и скорость ветра не превышает 10 м/с, то коэффициент теплоотдачи наружная стенка — воздух изменяется в пределах $20 \leq \alpha \leq 40 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. При длительном обильном дожде значения α могут колебаться в диапазоне $10^3 \leq \alpha \leq 5 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Даже если в первом случае в верхней части трубы конденсация была практически невозможна, то во втором (пленочное охлаждение водой наружной поверхности) — конденсация внутри трубы будет очень интенсивной. В последнем случае резко упадет температура стенки трубы и снова появятся условия для интенсивной конденсации пара.

Рассматриваемая парогазовая труба является устройством, в котором парогазовый поток движется вверх, а сконденсированная жидкость стекает по стенкам трубы вниз. Известно, что при встречном течении потоков существуют режимы захлебывания и полной инверсии течения пленки [8]. Режимы захлебывания свидетельствуют о гидродинамической неустойчивости двухфазного потока и сопровождаются большим выбросом жидкости с парогазовым потоком в атмосферу.

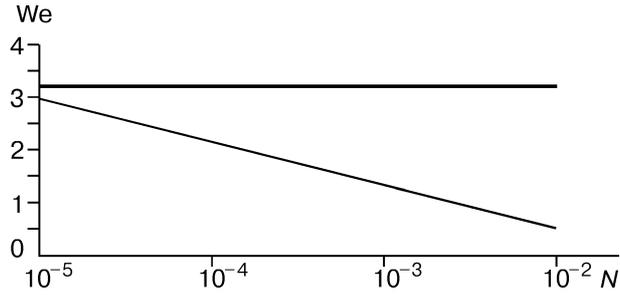
На рис. 1 приведена карта режимов течения двухфазных потоков жидкость – газ, построенная в [8] в координатах

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

Здесь $We = \frac{U_{\Gamma} \sqrt{\rho_{\Gamma}}}{\sqrt[4]{\sigma g (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma})}}$ — критерий Вебера, $We_{\text{кр}}$ — критическое значение

критерия Вебера; при котором имеет место режим захлебывания, $U_{\Gamma} = U_{\text{кр}}$ — скорость парогазового потока, при которой возникает режим захлебывания.

Рис. 1. Карта режимов двухфазных потоков по [8].



При вычислении критерия Вебера в (1) скорость потока принималась по ее значению на входе в трубу при охлаждении последней воздухом. Расчеты показали, что в этом случае скорость парогазового потока по всей высоте трубы уменьшалась не более чем на 5 %. При охлаждении верхней части трубы дождем или снегом скорость могла снизиться на 20 – 25 %. При вычислении числа We в этом случае принималось минимальное значение скорости потока (на срезе трубы).

$$N = \frac{U' \sigma^{1/2}}{gd^{3/2} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})^{1/2}} = \frac{\sqrt{\text{Fr}'}}{\text{Bo}}, \quad (2)$$

где $\text{Fr}' = \frac{U'^2}{gd}$ — число Фруда, построенное по скорости жидкости на границе

раздела жидкость — газ, $\text{Bo} = d \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}}$ — число Бонда.

Наклонной линией на рис. 1 указано осредненное значение числа Вебера, соответствующее режиму захлебывания и определенное по экспериментальным данным большого числа разных авторов. Горизонтальная линия — число Вебера, соответствующее режиму инверсии потока жидкости и ее полному выносу из трубы. Это значение числа Вебера получено Ю.Л. Сорокиным из обобщения экспериментальных данных. Карта режимов, представленная на рис. 1, служила эталоном, с которым сопоставлялись расчеты авторов при анализе гидродинамических режимов двухфазного парогазового потока внутри вытяжной трубы. В наших вычислениях критерия Вебера по (1) скорость и плотность газа заменялись скоростью и плотностью парогазового потока. При определении безразмерного параметра N в (2) под скоростью жидкости понималась скорость пленки конденсата, физические свойства которого принимались при температуре насыщения t_s .

Сравнение критериев подобия (1) и (2) в нашей задаче и сопоставление их с картой режимов для холодных потоков (см. рис. 1) предполагает, что трение на границах раздела газ — жидкость и парогазовый поток — пленка конденсата определяется одинаковыми закономерностями. В общем случае это неверно. Однако в рассматриваемой задаче поперечный поток вещества на большей части трубы очень мал и такое сопоставление критериев можно считать оправданным. Действительно, для нижней части трубы безразмерное значение поперечной скорости пара, влияющее на закон изменения трения на границе раздела фаз,

$$\bar{U} = q / r \rho_{\text{пр}} U_{\text{пр}} \leq 5 \cdot 10^{-5}.$$

При вычислении критерия Вебера по (1) скорость парогазового потока принималась по ее значению на входе в трубу при охлаждении последней воздухом. Расчеты показали, что в этом случае скорость потока по высоте трубы уменьшалась не более чем на 5 %. При охлаждении верхней части трубы дож-

дем или снегом скорость могла снижаться на 20 – 25 %. В данном случае при вычислении критерия Вебера принималось минимальное значение скорости потока (на срезе трубы).

Режиму захлебывания предшествуют ряд критических явлений, возникающих при меньших значениях пароголового потока [9]: а) начало каплеуноса, $U_{\text{пг}} \approx 0,5U_{\text{кр}}$; б) подвисяние пленки жидкости, $U_{\text{пг}} \approx 0,75U_{\text{кр}}$; в) частичный выброс жидкости в ядро потока, $U_{\text{пг}} \approx (0,85 - 0,9)U_{\text{кр}}$. В работе [9] приведены эмпирические критериальные уравнения, по которым можно оценить скорости потока, характеризующие перечисленные явления. Если рассмотреть несколько предельных ситуаций, то нетрудно убедиться, что толщина пленки конденсата внутри трубы в зависимости от погодных условий может изменяться в верхней части трубы почти на два порядка.

В таблице приведены некоторые характеристики вытяжных труб и режимов течения пароголовых потоков на трех предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности при их эксплуатации в разное время года. В первой строке вычисления выполнены при условиях: температура воздуха $t = 0$ °С, и идет длительный осенний дождь (пленочное охлаждение трубы над кровлей здания). Во второй и третьей строках показаны значения для условий, указанных в таблице, при скорости ветра 10 м/с. Все вычисления для нижней части трубы выполнены при ее охлаждении воздухом в режиме смешанной конвекции с температурой воздуха в цехе зимой +10 °С, летом +35 °С. Скорость воздуха при вынужденном поперечном обтекании труб в помещении принималась 0,5 м/с.

Первые три строки таблицы относятся к одной из труб бака плава содо-регенерационного котла Сигежского ЦБК, 4 – 6 строки — к трубе Братского

Основные параметры парогазового потока внутри вытяжной трубы

№ п/п	d , м	$T_{пр}$, °C	$G \cdot 10^{-3}$, м ³ /ч	$U_{пр}$, м/с	C , %	$m \cdot 10^3$, кг/с	T , °C	W , м/с	$Re_{шт}$	We	N	$We_{кр}$	$We/We_{кр}$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,6	85	13,8	13,7	30	0,53	0	Дождь	542	1,73	$1,2 \cdot 10^{-3}$	1,4	1,23
2	0,6	75	11,2	11,1	30	0,39	-7	10	40,1	1,7	$3,2 \cdot 10^{-4}$	1,8	0,95
3	0,6	125	6,7	6,6	45	0,28	+27	10	70,4	1,42	$2,4 \cdot 10^{-4}$	1,9	0,75
4	1,0	100	18	6,4	25	1,2	0	Дождь	509	0,93	$0,8 \cdot 10^{-3}$	1,4	0,7
5	1,0	90	18	6,4	14	0,83	-25	10	47,3	1,05	$1,56 \cdot 10^{-4}$	1,9	0,55
6	1,0	125	18	6,4	30	1,1	+25	10	60,4	1,4	$1,66 \cdot 10^{-4}$	1,9	0,7
7	0,6	90	6,9	6,8	15	2,1	0	Дождь	574	0,97	$1,8 \cdot 10^{-3}$	1,0	1,0
8	0,6	80	6,0	5,95	13,9	1,7	-18	10	34	0,75	$3,1 \cdot 10^{-4}$	1,8	0,42
9	0,6	96	5,4	5,35	16,4	1,7	13	10	47	0,9	$3,1 \cdot 10^{-4}$	1,8	0,5

ЦБК и 7 – 9 строки — к трубе на Байкальском ЛПК. Приведенные цифры являются первым приближением, так как при расчетах некоторые начальные параметры не были известны точно и принимались по оценкам их величин. Особенно сложно определение плотности орошения трубы дождем. Этот параметр, как и (следовательно) интенсивность теплоотдачи на внешней поверхности трубы, являются оценочными. Вычисление теплопередачи через стенку трубы от парогазового потока к окружающему воздуху или пленке воды, орошающей наружную поверхность трубы при дожде (снеге), проводилось по известным зависимостям, описывающим теплообмен при смешанной конвекции [10] или нагреве пленки [11, 12]. Коэффициент теплоотдачи при конденсации паровоздушной смеси с известной концентрацией воздуха в паре принимался по экспериментальным данным, приведенным в [13] для неподвижной парогазовой смеси. Это означает, что в расчетах принималось минимальное (из возможных) значение коэффициента теплоотдачи при конденсации.

Вычислив для каждой из указанных ситуаций удельный тепловой поток, можно было определить значение числа Рейнольдса пленки конденсата внутри трубы:

$$\text{Re} = \frac{\overline{U}\delta}{\nu} = \frac{qL}{\mu r}, \quad (3)$$

где q_1 и q_2 , Вт/м² — значения удельных тепловых потоков для верхней и нижней частей трубы, L_1 и L_2 — длина верхней и нижней частей трубы: $L_1 = 5 - 6$ м, $L_2 = 31 - 45$ м.

Значение скорости пленки на границе раздела определялось по формуле Нуссельта [11]

$$U' = 1,5 \left(\frac{g\nu}{3} \right)^{1/3} \text{Re}^{2/3}. \quad (4)$$

Оценка гидродинамических режимов внутри трубы проводилась по следующему алгоритму. Известными параметрами являлись диаметр вытяжной трубы, температура парогазового потока, расход и скорость парогазового потока на входе в трубу, исходная концентрация воздуха в паре, количество влаги в паре. Эти параметры приведены в таблице в колонках 1 – 6. Если задаться значениями температуры воздуха на улице и внутри здания, а также скоростью ветра на улице (колонки 7 и 8), то, решая задачу о теплопередаче, можно определить значение теплового потока для верхней и нижней частей вытяжной трубы, а затем вычислить число Re пленки по (3) и ее скорость по (4). По известному значению скорости пленки рассчитывается безразмерный параметр N по (2), а зная скорость парогазового потока и его температуру, вычисляется критерий Вебера по (1).

При известном значении параметра N для вытяжной трубы определялось критическое значение числа Вебера по карте режимов (см. рис. 1), которое сопоставлялось с вычисленным значением этого критерия для рассматриваемого режима. Величина отношения $We/We_{кр}$ (см. таблицу, колонка 13) позволяет судить о интенсивности выбросов влаги из вытяжной трубы.

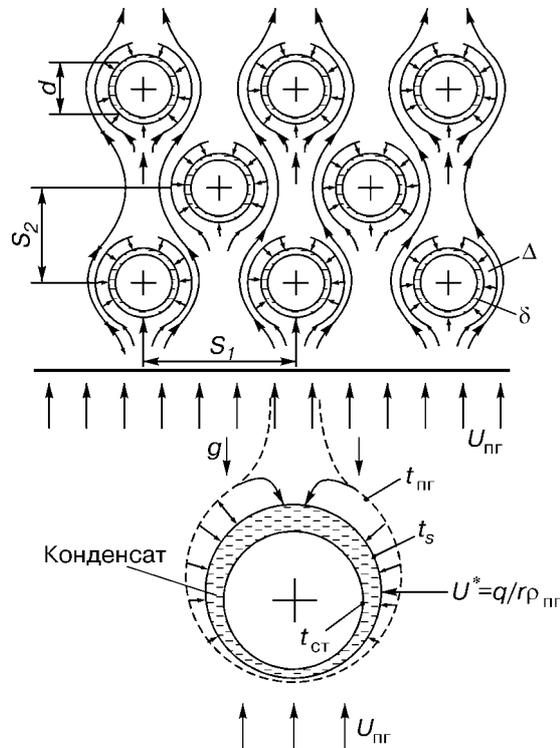
Приведенные в таблице значения критерия Вебера и безразмерного параметра N и их сопоставление с картой режимов течения [8] позволяют утверждать, что для всех принятых условий имеют место каплеунос щелочной пленки конденсата или выброс жидкости в ядро потока. Если труба охлаждается дождем или мокрым снегом, то наступает режим захлебывания. В последнем случае большая часть сконденсированной жидкости выносятся в атмосферу (см. таблицу, строки 1 и 7). По карте режимов Ю.Л. Сорокина [8]

находилось значение критического числа Вебера (см. таблицу) при вычисленном значении параметра $N(2)$.

Авторы данного сообщения запатентовали способ, позволяющий полностью исключить выброс влаги в атмосферу [14] и на 95 – 98 % снизить унос пылевых частиц и серосодержащих примесей. Устройство представляет собой пылегазоочистной конденсатор с наклоненными трубами, который располагается на входе парогазовых выбросов в вытяжную трубу. Парогазовая смесь поступает в межтрубное пространство аппарата снизу вверх и движется вверх за счет самотяги вытяжной трубы. Расположение трубного пучка под углом к горизонту позволяет устойчиво отводить образовавшийся конденсат вдоль по трубам до трубной доски. При этом ликвидируется режим захлебывания, который имеет место при горизонтальном расположении труб и встречном течении пара и жидкости в конденсаторе. Почти полностью исключается орошение нижерасположенных труб конденсатом. Полностью открытая нижняя стенка конденсатора обеспечивает равномерное распределение парогазовых выбросов по всему сечению на входе в аппарат.

Данное изобретение было внедрено и испытано на Сигежском ЦБК. Выполненные измерения [15] показали, что с помощью конденсатора удается снизить скорость парогазового потока в 3 – 5 раз. Снижение скорости полностью исключает выброс конденсатной пленки из вытяжной трубы (снижается число Вебера). Кроме того, уменьшается парциальное давление пара в трубе после конденсатора и, следовательно, интенсивность теплообмена при конденсации на стенках трубы. Это приводит к снижению скорости стекающей пленки и комплексного критерия $N(2)$. В соответствии с картой Ю.Л. Сорокина оба названных фактора приводят к стабилизации двухфазного течения внутри трубы. В [16] опубликованы результаты экспериментальных исследований на промышленном предприятии и приведены данные химических анализов отходящих газов после установки конденсатора.

На рис. 2 схематично показана физическая модель поглощения пылевых частиц и капель влаги, содержащихся в паре, пленкой конденсата.



Процесс конденсации приводит к появлению поперечной скорости потока смеси $U_* = q/r\rho_{пг}$. При шахматном расположении труб крупная частица (капля) обязательно попадет в пленку жидкости по инерции, а мелкая — под действием поперечной компоненты скорости потока. Серосодержащие примеси абсорбируются щелочной пленкой конденсата. Таким образом, отходящие газы очищаются до санитарных норм.

Рис. 2. Физическая модель очистки парогазовых выбросов в конденсаторе.

d — диаметр трубы, S_1 и S_2 — расстояние между трубами в шахматном пучке, δ — толщина пленки конденсата, Δ — толщина диффузионного пограничного слоя.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. На основе анализа гидродинамических параметров двухфазного потока в вытяжных трубах можно заключить, что при проектировании рассматриваемой трубы гидродинамический расчет двухфазных потоков либо не производился вообще, либо производился без учета явлений захлебывания и брызгоуноса. В таблице показано, что относительное изменение критерия Вебера находится в области $0,5 \leq We/We_{кр} \leq 1,23$, что свидетельствует об интенсивном выносе части сконденсированной жидкости в атмосферу.

2. Конденсатор наклонного типа перед входом парогазовых потоков в вытяжную трубу позволяет снизить скорость потока в 3 – 5 раз, что полностью исключает режимы захлебывания и брызгоуноса. Кроме того, он является эффективным газоочистным устройством, так как при его использовании поглощаются пылевые частицы, капли влаги и абсорбируются серосодержащие примеси.

3. Сконденсированный пар является источником сэкономленной энергии, а нагретая им вода может применяться для обогрева жилых (производственных) помещений или испарителей в тепловых насосах.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

t'' , °С — температура насыщения при данном парциальном давлении пара;
 $t_{пт}$, °С — измеренная температура парогазового потока на входе в вытяжную трубу;
 $G_{пт}$, м³/ч — объемный расход парогазового потока на входе в трубу;
 m , кг/с — влагосодержание потока смеси;
 σ , Н/м — поверхностное натяжение конденсата;
 μ , Па·с; ν , м²/с — динамическая и кинематическая вязкость жидкости;
 U_{*} , м/с — поперечная компонента скорости парогазового потока в конденсаторе;
 C , % — массовая концентрация воздуха на входе парогазового потока в трубу;
 q , Вт/м² — удельный тепловой поток через стенку вытяжной трубы;
 d , м — внутренний диаметр вытяжной трубы;

$t_{ст}$, °С — температура стенки внутри трубы;
 t , °С — температура окружающего воздуха;
 $U_{г}$, $U_{пт}$, м/с — измеренная скорость газа и парогазового потока;
 $\rho_{г}$, $\rho_{пт}$, кг/м³ — плотность газа и парогазового потока;
 ρ' , ρ'' , кг/м³ — плотности жидкости и пара;
 r , Дж/кг — скрытая теплота парообразования;
 U' , м/с — скорость пленки на границе раздела пар — пленка;
 g , м/с² — ускорение свободного падения;
 F , м² — теплообменная поверхность вытяжной трубы;
 W , м/с — поперечная скорость воздуха, омывающего трубу над кровлей здания;
 L_1 и L_2 , м — высота верхней и нижней частей трубы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Очистка** и рекуперация промышленных выбросов / Под ред. В.Ф. Максимова, И.В. Вольфа. — М.: Лесная промышл., 1989. — 416 с.
2. **Лендзел П., Морван Ш.** Химия и технология целлюлозно-бумажного производства. — М.: Лесная промышл., 1989.
3. **Братчиков Г.Г.** Очистка газовых выбросов в целлюлозно-бумажной промышленности. — М.: Лесная промышл., 1989.
4. **Липовков И.З.** Содорегенерационные котлоагрегаты. — М.: Лесная промышл., 1968. — 82 с.
5. **Бойков Л.М.** Исследование процессов взаимодействия воды с плавом сульфатного щелока как возможной причины топочных взрывов. — Дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1971.
6. **Корчунов Ю.Н., Фролов Б.Ф.** Исследование взрывного процесса при взаимодействии солей натрия с водой как одной из причин разрушительных аварий в топке СРК // Исследование и разработка элементов энергетического оборудования: Тр. ЦКТИ. — 1976. — Вып. 138. — С. 10 – 17.
7. **Пасечник Ю.Н., Торф А.И.** Газоочистные установки растворителей плава содорегенерационных котлоагрегатов. — М. ВНИПИЭИлеспром, 1977.
8. **Сорокин Ю.Л., Кирдяшкин А.Г., Покусаев Б.П.** Исследование устойчивости пленочного режима течения жидкости в вертикальной трубе при восходящем движении газа // Хим. и нефт. машиностроение. — 1965. — № 5. — С. 35 – 38.
9. **Безродный М.К.** Режим захлебывания противоточного движения жидкости и пара в условиях замкнутых термосифонов // Тепломассообмен VII. Т.IV, ч. 2. — Минск, 1984. — С. 23 – 28.

10. **Справочник** по теплообменникам. Т. 1: Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 560 с.
11. **Тананайко Ю.М., Воронцов Е.Г.** Методы расчета и исследования пленочных процессов. — Киев: Техника, 1975. — 311 с.
12. **Дорохов А.Р., Гогонин И.И.** К расчету теплообмена при стекании тонких пленок жидкости по вертикальной поверхности // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. — 1989. — Вып. 5. — С. 15 – 20.
13. **Брдлик П.М.** Конденсация пара из неподвижных парогазовых смесей // ИФЖ. — 1959. — Т. 2, № 3. — С. 3 – 8.
14. **Пат. № 2043444.** Устройство для регенерации тепла из парогазовых выбросов растворителя плава сорегенерационного котлоагрегата / Романова Л.В., Е.А. Стасюк, В.Г. Родионов, И.И. Гогонин. Зарегистр. в Гос. реестре 10.09.95.
15. **Романова Л.В.** Конденсационный метод очистки выбросов растворителя плава сорегенерационного котлоагрегата сульфат-целлюлозного производства с рекуперацией химикатов и утилизацией вторичного тепла. — Реф. дис. ... канд. техн. наук. — С.-Петербург, Гос. ун-т растит. полимеров, 1994. — 19 с.
16. **Романова Л.В., Гогонин И.И.** Очистка парогазовых выбросов с помощью конденсатора // Теплоэнергетика. — 1997. — № 7. — С. 57 – 61.

Статья поступила в редакцию 14 мая 1998 г.