



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 66.021.3.001.57:532.529

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-182-194

Рекуперация и очистка газовых выбросов целлюлозного производства

С.В. Анискин , *д-р техн. наук, проф.*; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-381X>

В.С. Куров, *д-р техн. наук, проф.*; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; asv-47@mail.ru , vskurov18@mail.ru

Поступила в редакцию 24.11.22 / Одобрена после рецензирования 20.02.23 / Принята к печати 22.02.23

Аннотация. Для производства целлюлозы построены крупномасштабные предприятия, к которым в процессе их эксплуатации предъявляются новые, отличающиеся от проектных, требования по экономической эффективности, безопасности труда, воздействию на местное население и окружающую среду. Значительный успех в этой работе достигнут изменением технологии регенерации щелока, переходом к сжиганию черного щелока повышенной концентрации, что позволяет практически полностью ликвидировать самый крупный источник выбросов сероводорода и метилмеркаптана с дымовыми газами, снизить потери серы и повысить энергетическую эффективность содорегенерационных котлов. Другим значимым источником выбросов содорегенерационного котла является труба бака растворителя плава. В баке происходит технологическая операция растворения расплавленных солей натрия слабым белым щелоком, который подается из цеха каустизации. Современное развитие технологии растворения плава связано с совершенствованием оборудования, совместимого с технологией регенерации химических реактивов производства целлюлозы. На вытяжной трубе бака плава устанавливают теплообменники и газоочистные аппараты систем «газ–жидкость», которые легче приспособить к технологическим требованиям по сравнению с другими системами. Установка такого оборудования приводит к изменению технологии растворения плава и затрагивает технологию каустизации и регенерации извести. Проведено исследование взаимосвязи технических решений по обеспечению безопасности персонала в помещении котельного цеха, по рекуперации тепла, химикатов и очистке газовых выбросов с изменениями технологии растворения плава содорегенерационного котла целлюлозного производства. На основе экспериментальных данных и математической модели движения парогазовой смеси в вытяжной трубе бака растворителя плава рассмотрена технологическая возможность установки теплообменников на разной высоте трубы и возможность эффективной очистки газовых выбросов с помощью прямоточного распылительного аппарата. Также изучены применяемость орошения парогазового потока

© Анискин С.В., Куров В.С., 2024



Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

слабым белым щелоком, образующимся в цикле регенерации химикатов целлюлозного производства, и условия обеспечения надежной работы газоочистного оборудования. Получены количественные характеристики необходимого изменения потребления и состава слабого белого щелока, способы его подачи в бак плава.

Ключевые слова: плав, раствор, слабый белый щелок, пыль, сероводород, регенерация, рекуперация, конденсат, очистка, воздух, пар

Для цитирования: Анискин С.В., Куров В.С. Рекуперация и очистка газовых выбросов целлюлозного производства // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 182–194. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-182-194>

Original article

Recovery and Purification of Gas Emissions from Pulp Production

Sergey V. Aniskin[✉], Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8819-381X>

Victor S. Kurov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [V-7289-2017](https://orcid.org/0000-0002-7168-9613),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7168-9613>

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; asv-47@mail.ru[✉], vskurov18@mail.ru

Received on November 24, 2022 / Approved after reviewing on February 20, 2023 / Accepted on February 22, 2023

Abstract. For pulp production, large-scale enterprises have been built which, while in operation, are subject to new requirements, different from the design ones, for economic efficiency, labour safety, as well as impact on the local population and the environment. Significant success in this work has been achieved by changing the liquor recovery technology, switching to burning black liquor of increased concentration, which makes it possible to almost completely eliminate the largest source of hydrogen sulfide and methyl mercaptan emissions with flue gases, reduce sulfur losses and improve energy efficiency of soda recovery boilers. Another significant source of soda recovery boiler emissions is a smelt dissolving tank vent. An important technological operation of dissolving molten sodium salts with weak white liquor supplied from the causticization shop takes place in the tank. The modern development of smelt leaching technology is related to the improvement of equipment compatible with the technology of regeneration of chemical reagents for pulp production. Heat exchangers and gas purifiers of “gas-liquid” systems, easier to adapt to technological requirements compared to other systems, are installed on the dissolving tank vent. The installation of such equipment provides the change in the smelt leaching technology, and affects the technology of causticization and lime recovery. This article covers the research of the relationship between the technical solutions ensuring the safety of personnel in the boiler shop, heat and chemicals recovery, as well as purification of gas emissions and the changes in the technology of smelt leaching in the soda recovery boiler of the pulp mill. On the basis of experimental data and a mathematical model of the movement of the vapour-gas mixture in the smelt dissolving tank vent, the technological feasibility of installing heat exchangers at different heights of the vent and the possibility of effective purification of gas emissions using a direct-flow sprayer have been considered. The applicability of the irrigation of the steam-gas flow with weak white liquor, which is formed during the cycle of chemical regeneration in pulp production, as well as the conditions for ensuring reliable operation of gas purification equipment, have been

investigated. The quantitative characteristics of the necessary change in consumption and composition of weak white liquor and the methods of its supply to the dissolving tank have been obtained.

Keywords: melt, solution, weak white liquor, dust, hydrogen sulfide, regeneration, recuperation, condensate, purification, air, vapour

For citation: Aniskin S.V., Kurov V.S. Recovery and Purification of Gas Emissions from Pulp Production. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 182–194. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-182-194>

Введение

Плав, образующийся в содорегенерационных котлах (СРК) сульфатного производства целлюлозы, необходим для создания замкнутого цикла регенерации варочного раствора [17, 18]. Плав является восстановленным расплавом солей натрия с температурой 850–900 °С. Он состоит в основном из соединений натрия: карбоната – 60–80 %, сульфида – 10–30 %, сульфата – 10–15 % и гидроксида – 2–4 % [9].

Плав растворяют в слабом белом щелоке с температурой 70–80 °С в специально оборудованном баке-растворителе. В результате образуется зеленый щелок с температурой 90 °С. Технология растворения плава включает мероприятия: для предотвращения взрывов, перемешивания зеленого щелока и снижения выбросов пара и вредных веществ в рабочее помещение [8, 11].

Для предотвращения взрывов при сливе внутри бака до контакта с раствором плав дробят на части с помощью струй пара. Растворение производят при перемешивании. Бак оборудован вытяжной трубой и крышкой с открытым окном у летки, в которое сливается плав. В настоящее время практически отсутствует понимание бака плава как устройства местной вентиляции с самотягой, предназначенного для снижения токсичных выбросов в рабочее помещение. Обычно ограничиваются представлением о необходимости отвода в атмосферу газов и паров, выделяющихся при растворении плава [5, 10]. Эта функция отражает лишь часть работы местной вентиляции. Труба должна обеспечивать не только выход парогазового потока, ее основная задача заключается в создании разрежения внутри бака, достаточного для засасывания воздуха из рабочего помещения через окно летки со скоростью, требуемой нормами безопасности противоточного проникновения токсичных веществ в помещение котельного цеха. Вентиляционная труба не является средством подавления или предотвращения взрыва. Внутри бака над поверхностью раствора образуется паровоздушная смесь, в которой содержатся мелкие частички плава в виде насыщенной парами воды пыли, брызги зеленого щелока, газы в виде сероводорода и метилмеркаптана, которые являются токсичными.

Наиболее токсичны сероводород и метилмеркаптан, которые относятся к высокоопасным газам (класс опасности – 2). Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны для сероводорода – 10 мг/м³, для метилмеркаптана – 0,8 мг/м³. В соответствии с требованиями безопасности для местной вытяжной вентиляции скорость подсоса воздуха из цеха в бак плава, по строительным правилам (СП 118.13330–2012 «Общественные здания и сооружения»), для общественных зданий и сооружений должна быть не менее 1 м/с. Для нефтехими-

ческих предприятий [2] по метилмеркаптану следует увеличивать предельную скорость до 1,3 м/с (ВНТП 3–85 «Нормы технологического проектирования объектов сбора, транспорта, подготовки нефти», ВСН 21–77 «Инструкция по проектированию отопления и вентиляции нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий»).

По результатам измерений [6], на различных предприятиях отрасли паровоздушный поток в трубах бака плава состоит из воздуха на 20 % и из пара – на 80 %, т. е. из воздуха, насыщенного паром при температуре около 93 °С. Количество пылевого уноса в пересчете на карбонат натрия составляет 4,5 кг/т абсолютно сухой целлюлозы, количество сероводорода в пересчете на серу – 0,056 кг/т абсолютно сухой целлюлозы. С плавом теряется 4–5 % тепла в балансе СРК, которые можно частично вернуть, конденсируя парогазовые выбросы [9].

По этой причине возникают другие задачи, прямо не связанные с безопасностью персонала, – это задачи возврата (рекуперации) тепла и химикатов, а также снижения вредных выбросов в окружающую среду. Известно, что при установке теплообменников и скрубберов [3, 15] образуется значительное количество конденсата и изменяются тягодутьевые характеристики вытяжной трубы [6], что может приводить к изменению состава зеленого щелока и режима работы вытяжной вентиляции. Большое значение имеют способ подачи слабого белого щелока и содержание в нем извести, особенно для достижения высокой степени очистки газовых выбросов. Из этого следует, что решение обозначенных задач повлечет изменение технологии растворения плава.

Цель – исследование изменения технологического режима растворения плава при установке оборудования для рекуперации и очистки газовых выбросов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является изменение технологического режима растворения плава при установке теплообменного и газоочистного оборудования: количества образующегося конденсата, скорости и температуры парогазового потока, тягодутьевого давления, содержания извести в слабом белом щелоке и способа его подачи в бак плава.

Исследование проводили методом математического моделирования процессов массо- и теплообмена в парогазовых выбросах бака плава. Разработаны М-файлы в среде MatLab. Решение представлено в виде замкнутой системы уравнений и в виде графиков, отражающих численные взаимосвязи искомых параметров.

Анализ осадков в элементах оборудования струйного газопромывателя (СГП) выполнялся в заводской лаборатории Архангельского целлюлозно-бумажного комбината гравиметрическим методом с выпариванием фильтра и контролем кальция на пламенном фотометре.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотрим изменение режима транспортировки паровоздушной смеси в вытяжной трубе при установке теплообменника. Наиболее широко применяются трубчатые теплообменники различных фирм, располагаемые внутри вытяжной трубы на значительной высоте от крышки бака плава. Тепло парогазовых

выбросов используется для подогрева воды или воздуха, подаваемого в топку СРК. Трубчатый теплообменник одновременно используют для рекуперации натрия и серы, содержащихся в пылевых частицах, – на 60–70 %. Такое значительное улавливание мелкодисперсной пыли со средним весовым размером 5–10 мкм на трубах большого диаметра может происходить из-за возникновения стефановского движения парогазовой смеси к поверхности теплообменника при интенсивной конденсации пара. В г. Коряжма на целлюлозно-бумажном комбинате филиала АО «Группа Илим» установлен теплообменник, выполненный из отдельных сегментов, приваренных вертикально внутри цилиндрического корпуса газоочистной установки. По результатам измерений авторов, эффективность регенерации составила более 80 % без орошения слабым белым щелоком. Также высокая степень регенерации достигнута Л.В. Романовой с помощью теплообменника с наклонными трубками, который в отличие от предыдущих был установлен перед вытяжной трубой внутри бака плава [7].

Установка теплообменника в вытяжной трубе приводит к снижению температуры, образованию конденсата, уменьшению содержания пара. Как следствие, увеличивается плотность газа, снижается самотяга, что может, несмотря на снижение количества пара в трубе после прохождения им теплообменника, уменьшить или увеличить расход части парогазовой смеси – воздуха, подсаемого из помещения, и повысить выброс сероводорода и влажной содовой пыли в рабочее помещение.

Оценим изменение безопасности выбросов сероводорода в рабочем помещении в зависимости от места установки теплообменника. Самотяга возникает из-за разницы плотности газа в трубе и внешнего атмосферного воздуха [4], поэтому величина самотяги существенно варьирует в зависимости от места расположения теплообменника и количества возвращаемого тепла. При расчете самотяги [2] учитывают изменение погодных условий в течение года. По летней температуре воздуха в приземном слое атмосферы примем ее равной 20 °С.

При смешении большого количества пара с воздухом из помещения цеха, как было описано выше, образуется предельно насыщенный (на 80 %) паром воздух. Паровоздушная смесь такого состава при нормальном давлении существует при температуре около 93 °С. После теплообменника парогазы также находятся в насыщенном состоянии, но имеют меньшую температуру. Исчезнувший пар превращается в конденсат, который стекает в бак плава в дополнение к слабому белому щелоку.

Построим математическую модель движения парогазового потока. Пусть теплообменник установлен на определенной высоте вытяжной трубы и делит ее на 2 части с разными плотностью и температурой парогазовой смеси:

$$H = H_1 + H_2, \quad (1)$$

где H , H_1 , H_2 – высота трубы и участков 1 и 2 установки теплообменника соответственно, м.

Выталкивающее давление самотяги вытяжной трубы ΔP_T определяется силой Архимеда:

$$\Delta P_T = H_1 g (\rho_a - \rho_{T1}) + H_2 g (\rho_a - \rho_{T2}), \quad (2)$$

где g – ускорение силы тяжести, м/с²; ρ_a – плотность атмосферного воздуха, кг/м³; ρ_{T1} , ρ_{T2} – плотность парогаса на участках H_1 и H_2 соответственно, кг/м³.

Определять плотность парогазовой смеси (мм рт. ст.) будем через парциальные давления, которые вычислим с помощью уравнения Антуана для паров воды [16]:

$$\ln P_{\text{п}} = A - \frac{B}{T_{\text{т}} + C}, \quad (3)$$

где A , B , C – константы (для пара $A = 18,3036$; $B = 3816,4400$; $C = -46,1300$); $T_{\text{т}}$ – температура парогазовой смеси в трубе, К.

Парциальное давление насыщенного пара зависит только от температуры. Запишем парциальные давления на участках H_1 и H_2 в паскалях:

$$P_{\text{п1}} = 133,3 \text{e}^{\frac{A-B}{T_{\text{п1}}+C}}; \quad (4)$$

$$P_{\text{п2}} = 133,3 \text{e}^{\frac{A-B}{T_{\text{п2}}+C}}. \quad (5)$$

Парциальное давление воздуха в трубе определяется разницей атмосферного давления и парциального давления пара. Используя уравнение состояния газа Менделеева – Клапейрона, запишем уравнения для плотности воздуха в трубе:

$$\rho_{\text{в.т1}} = \frac{P_{\text{а}} - P_{\text{п1}}}{R_{\text{в}} T_1}; \quad (6)$$

$$\rho_{\text{в.т2}} = \frac{P_{\text{а}} - P_{\text{п2}}}{R_{\text{в}} T_2}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{в.т}}$ – плотность воздуха в трубе, кг/м³; $R_{\text{в}}$ – удельная газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·К) ($R_{\text{в}} = 281,5$ Дж/(кг·К)).

Уравнения для плотности насыщенного паром воздуха в трубе будут иметь вид:

$$\rho_{\text{т1}} = \frac{P_{\text{п1}}}{R_{\text{п}} T_1} + \frac{P_{\text{а}} - P_{\text{п1}}}{R_{\text{в}} T_1}; \quad (8)$$

$$\rho_{\text{т2}} = \frac{P_{\text{п2}}}{R_{\text{п}} T_2} + \frac{P_{\text{а}} - P_{\text{п2}}}{R_{\text{в}} T_2}, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{т}}$ – плотность парогазовой смеси в трубе, кг/м³; $R_{\text{п}}$ – удельная газовая постоянная пара, Дж/(кг·К) ($R_{\text{п}} = 452,5$ Дж/(кг·К)).

Сопротивление парогазового потока в вытяжной трубе определяется через динамическое давление и коэффициенты сопротивления следующим уравнением:

$$\Delta P_R = \left(\lambda \frac{H_1}{D} + \xi_1 \right) \frac{\rho_{\text{т1}} v_{\text{т1}}^2}{2} + \left(\lambda \frac{H_2}{D} + \xi_2 \right) \frac{\rho_{\text{т2}} v_{\text{т2}}^2}{2}, \quad (10)$$

где λ – безразмерный коэффициент сопротивления поверхности газохода; ξ – местный коэффициент сопротивления элементов газохода; D – диаметр газохода; $v_{\text{т1}}$, $v_{\text{т2}}$ – скорость движения газа в первой и второй частях газохода соответственно.

При установившемся стационарном движении газа сопротивление движению газового потока всегда равно тягодутьевому напору:

$$\Delta P_T = \Delta P_R. \quad (11)$$

Связь между скоростями движения газа в первой и второй частях газохода определяется уравнением сохранения массового расхода воздуха:

$$G_B = \rho_{в.т} v_T S = \text{const}; \quad (12)$$

$$v_{T2} = \frac{\rho_{в.т1}}{\rho_{в.т2}} v_{T1}, \quad (13)$$

где S – площадь сечения трубы, м².

Скорость парогазового потока в трубе с учетом уравнений (10) – (13) можно записать в следующем виде:

$$\Delta P_R = \left[\left(\lambda \frac{H_1}{D} + \xi_1 \right) \frac{\rho_{T1}}{2} + \left(\lambda \frac{H_2}{D} + \xi_2 \right) \frac{\rho_{T2}}{2} \left(\frac{\rho_{в.т1}}{\rho_{в.т2}} \right)^2 \right] v_{T1}^2. \quad (14)$$

Введем для удобства записи функцию f :

$$P_R = f v_{T1}^2. \quad (15)$$

Из уравнений (2) и (14), (15) можно определить скорость движения газа в нижней части трубы:

$$v_{T1} = \sqrt{\frac{\Delta P_T}{f}}. \quad (16)$$

Используя уравнение (13), установим скорость движения газа в верхней части трубы. Массовый расход пара в любой части трубы находится из следующего уравнения:

$$G_{п} = \frac{P_{п}}{R_{п} T} \pi \frac{D^2}{4} v_T. \quad (17)$$

Определим скорость воздуха, всасываемого в бак плава:

$$v_6 = v_{T1} \frac{\rho_{в.т1} S_T}{\rho_6 S_6} = k v_{T1} \frac{\rho_{в.т1}}{\rho_6}, \quad (18)$$

где ρ_6 – плотность воздуха в помещении цеха; S_T , S_6 – площадь вытяжной трубы и окна бака плава соответственно; k – коэффициент отношения S_T к S_6 .

На основе системы уравнений (1) – (18) была создана программа в среде MatLab, которая позволила получить функциональные характеристики влияния установки теплообменника на условия растворения плава. Расчеты проводились при следующих условиях: $H = 24$ м; $D = 1$ м; $\lambda = 0,02$; $\xi_1 = 1,5$; $\xi_2 = 1$; $k = 0,593$; вентиляция позволяет вывести весь пар при температуре 93 °С; летняя температура атмосферного воздуха и воздуха внутри цеха, как было отмечено выше, составляет 20 °С.

На рис. 1 представлена зависимость скорости всасывания воздуха в бак плава от изменяющейся в результате работы теплообменника, установленного перед вытяжной трубой, температуры насыщенного паром воздуха вытяжной трубы.

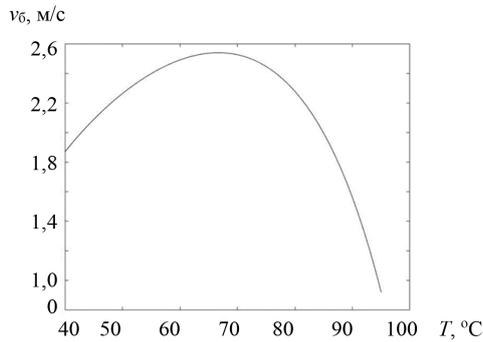


Рис. 1. Зависимость скорости всасывания воздуха в бак плава от температуры насыщенного паром воздуха вытяжной трубы
 Fig. 1. Dependence of the rate of air intake into the dissolving tank on the temperature of the air saturated with vapour in the vent

Из графика рис. 1 следует, что с увеличением рекуперации тепла скорость подсоса воздуха в бак плава возрастает при снижении температуры до 67 °С, а далее уменьшается. Тем не менее при снижении температуры до 40 °С скорость подсоса воздуха – 1,8 м/с, что больше начальной нормативной скорости при 93 °С в отсутствие рекуперации тепла, поэтому безопасность выбросов сероводорода в помещение цеха обеспечивается.

На рис. 2 представлена зависимость скорости движения насыщенной парогазовой смеси в вытяжной трубе от температуры насыщения. График имеет линейную и нелинейную части. Снижение скорости значительно. Переход совпадает с максимумом на рис. 1 и соответствует 67 °С. При высоких температурах скорость парогазового потока снижается более интенсивно. При 93 °С она составляет 11 м/с, при 70 °С – 7 м/с, а при 40 °С – до 3,5 м/с. Это позволяет, например, существенно уменьшить диаметр вытяжной трубы при условии надежной работы конденсатора, что делают для вытяжной вентиляции бумагоделательной машины.

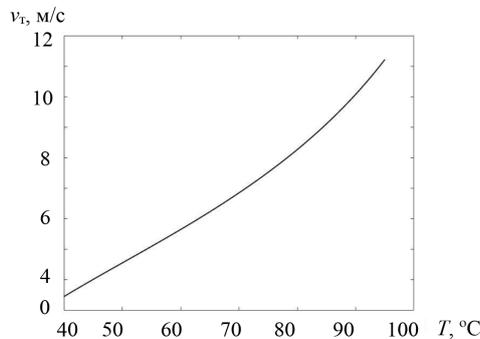


Рис. 2. Зависимость скорости движения насыщенной парогазовой смеси в вытяжной трубе от температуры насыщения
 Fig. 2. Dependence of the rate of movement of the saturated vapour-gas mixture in the vent on the saturation temperature

На рис. 3 и 4 представлены результаты расчетов при установке конденсатора внутри трубы на разной высоте при условии, что он снижает температуру насыщенного паром воздуха с 93 до 75 °С. Из кривой 1 рис. 3 следует, что при установке конденсатора внутри трубы, так же как и для рассмотренного ранее варианта установки конденсатора – перед трубой, скорость всасывания воздуха обеспечивает безопасность персонала. Возрастание скорости всасывания с увеличением высоты расположения конденсатора связано с повышением самотяги трубы и скорости движения парогазовой смеси.

Кривая 2 рис. 3 показывает, что при снижении температуры парогазовой смеси до 75 °С образуется много конденсата, его количество может достигать 14 м³/ч.

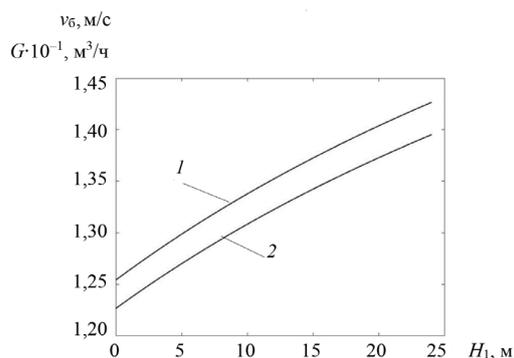


Рис. 3. Изменение характеристик вытяжной вентиляции при установке конденсатора на разной высоте трубы: 1 – скорость всасывания воздуха в бак плава; 2 – количество конденсата

Fig. 3. Change in the characteristics of exhaust ventilation when installing the condenser at different heights of the vent: 1 – the rate of air intake into the dissolving tank, 2 – the amount of condensate

При снижении температуры до 60 °С количество конденсата возрастает еще больше. Расход слабого белого щелока, необходимого для растворения плава СРК 725 т/сут. а.с.в., составляет 42 м³/ч [8]. Количество выбрасываемой пыли, большей частью состоящей из карбоната натрия, может быть 30 кг/ч. Таким образом, конденсат является слабым раствором, содержащим около 2 г/л карбоната натрия, в то время как слабый белый щелок содержит 90–150 г/л NaOH. При уменьшении подачи слабого белого щелока на величину объема конденсата возможно снижение концентрации первого на 33 %.

На рис. 4 представлены графики изменения скорости движения насыщенной паровоздушной смеси до и после прохождения конденсатора. Скорость снижается с 11–13 до 4 м/с. Разница немного возрастает с увеличением высоты установки конденсатора, что связано с повышением тягодутьевого давления. Снижение скорости в трубе может быть полезно для решения экологической задачи.

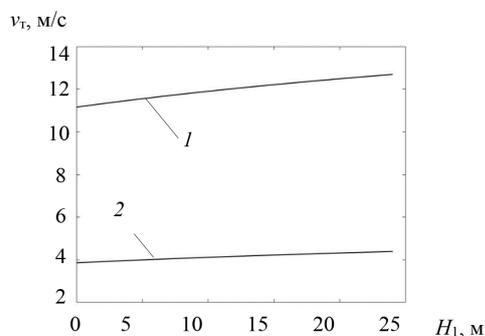


Рис. 4. Изменение скорости движения насыщенной паровоздушной смеси в зависимости от высоты установки теплообменника: 1 – ниже теплообменника; 2 – выше

Fig. 4. Change in the rate of movement of the saturated air-vapour mixture depending on the installation height of the heat exchanger: 1 – below the heat exchanger; 2 – above the heat exchanger

При решении экологической задачи недостаточна эффективность улавливания пылегазовых выбросов теплообменниками – не более 80 % [13]. С целью повышения показателя для очистки вентиляционных выбросов из бака плава авторами [6] были разработаны и испытаны СГП, которые являются прямоточными распылительными аппаратами. Предложенная схема очистки газов вентиляции бака растворителя плава на основе СГП представлена на рис. 5.

Основное преимущество СГП по отношению к другим скрубберам заключается, наряду с высокой эффективностью и простотой, в создании тягодутьевого эффекта [12, 14], который компенсирует сопротивления поворотов газохода и каплеуловителя, не требует установки вентилятора в насыщенный

паром воздушный поток. Производственные испытания показали высокую эффективность очистки парогазовых выбросов от пыли, сероводорода и метилмеркаптана – более 95 %.

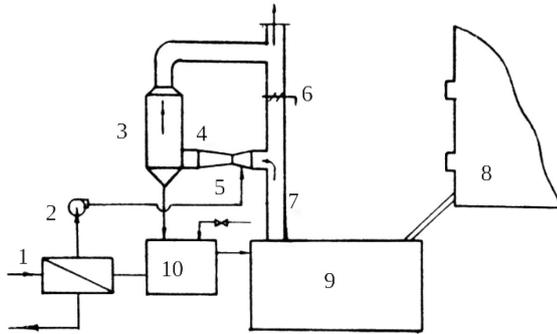


Рис. 5. Схема очистки газов вентиляции бака растворителя плава: 1 – теплообменник; 2 – насос; 3 – каплеуловитель; 4 – СГП; 5 – форсунки; 6 – шибер; 7 – вытяжная труба; 8 – СРК; 9 – бак плава; 10 – сливной бак

Fig. 5. Scheme of purification of the gases from the smelt dissolving tank ventilation system: 1 – heat exchanger; 2 – pump; 3 – drop catcher; 4 – SGW; 5 – nozzles; 6 – gate; 7 – vent; 8 – SRB; 9 – dissolving tank; 10 – drain tank

Однако использование СГП не получило широкого распространения для очистки газовых выбросов из бака плава. Главный недостаток очистки газов по такой схеме заключается в том, что работа СГП со временем прекращается. Причина – в высоком содержании извести в слабом белом щелоке, поступающем для растворения плава. Этот же щелок частично подается для орошения СГП. Как оборудование, так и схема с циркуляцией через теплообменник были предложены к эксплуатации без учета возможности образования известковых отложений. Исследования СГП на Архангельском целлюлозно-бумажном комбинате показали, что известь, которая осаждается на внутренних поверхностях системы орошения, приводит к забиванию форсунок, трубопроводов, насоса и теплообменника. Известь попадает в зеленый щелок и содержится в пылевых выбросах бака плава. Химический состав осадков циркулирующего раствора в контуре без теплообменника и с подпиткой технической водой (без подачи слабого белого щелока) представлен в таблице. Результаты опытов показали, что известь находится в растворе для орошения в виде взвеси, которая осаждается в насосах, сливных трубах, форсунках, баке орошающего раствора и теплообменнике. Накопление осадка парализует работу газоочистного оборудования.

Химический анализ осадков в элементах оборудования СГП

Chemical analysis of the sediments in the elements of the SGW equipment

Параметр	Осадок		Фильтрат из бака
	из сливной трубы	из форсунок	
Растворимость в воде, %	3,71	5,41	–
pH	7,20	7,30	9,55
Потери при прокаливании (900 °С), %	45,50	40,38	52,96
Органическая часть, %	10,27	7,59	25,86
SiO ₂ , %	0,59	5,14	1,92
Fe ₂ O ₃ , %	5,32	9,62	4,64
CaCO ₃ , %	78,46	74,30	61,41
<i>Итого, %</i>	94,64	96,66	93,83

Содержание извести в слабом белом щелоке зависит от используемых на предприятии технологий ее регенерации, которые можно условно разделить на технологию с отстойниками-осветлителями и технологию с фильтрами для слабого белого щелока, такими же, как при «шлифовании» крепкого белого щелока [5]. Для решения экологической задачи очистки газовых выбросов из бака плава преимущественной является технология регенерации извести с фильтрацией слабого белого щелока.

При отсутствии фильтрации необходимо использовать оборудование СГП, подобное оборудованию цеха регенерации извести, предназначенное для работы в условиях осаждения извести. Необходимо исключить циркуляцию орошающего раствора и теплообменник в предложенной схеме. При отказе от циркуляции требуется практически весь слабый белый щелок направлять в бак плава, предварительно пропуская его через форсунки. Любое решение при установке СГП по схеме с циркуляцией, и тем более без нее, приводит к изменению технологии подачи слабого белого щелока в бак плава.

Рассмотрим возможность решения экологической задачи при последовательной установке теплообменника и СГП в парогазовом потоке. Как показано на рис. 4, после конденсации пара скорость парогазового потока может быть снижена в 3 раза. Это означает, что во столько же раз уменьшается очищаемый объем газа и расход орошающего раствора для СГП. На этой основе в отраслевой лаборатории был разработан регламент для проектирования очистки газопылевых выбросов из бака растворителя плава СРК.

К настоящему времени нами предложен ряд конструкций прямоточных распылительных аппаратов, которые обладают повышенной надежностью контроля качества распыливания раствора форсунками и прошли практические испытания [1]. Это является основой создания нового оборудования для растворения плава, полностью соответствующего технологическим требованиям, обеспечивающего безопасность, позволяющего в значительной степени возвращать в производственный цикл тепло, натрий и серу, а также снижать выбросы в атмосферу до нормативных значений без сброса сточных вод в канализацию.

Выводы

1. Построена математическая модель системы местной вентиляции растворения плава с возможностью установки теплообменника.

2. Определено, что установка теплообменника перед вытяжной трубой или в вытяжной трубе на любой высоте не приводит к увеличению токсичных выбросов из бака плава в помещение цеха.

3. Работа теплообменника обуславливает образование конденсата, снижение потребления слабого белого щелока и необходимости увеличения его концентрации.

4. Применение теплообменника позволяет в несколько раз снизить объемный расход парогазового потока, за счет чего существенно улучшаются условия для очистки газовых выбросов.

5. Значительное содержание извести в слабом белом щелоке снижает надежность оборудования очистки газовых выбросов и требует подачи большей части слабого белого щелока в бак плава через струйный газопромыватель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анишкин С.В., Куров В.С. Разработка прямоточных распылительных аппаратов повышенной надежности, совместимых с технологией целлюлозно-бумажного производства // Вестн. СПбГТУД. Сер. 4: Промышл. технологии. 2022. № 1. С. 90–94.

Aniskin S.V., Kurov V.S. Development of High-Reliability Direct-Flow Spray Devices Compatible with Pulp and Paper Production Technology. *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 4: Industrial Technologies*, 2022, no. 1, pp. 90–94. (In Russ.). https://doi.org/10.46418/2619-0729_2022_1_13

2. Баркалов Б.В., Павлов Н.Н., Амирджанов С.С., Гримитлин М.И., Моор Л.Ф., Позин Г.М., Креймер Б.Н., Рубчинский В.М., Садовская Т.И., Березина Н.И., Бычкова Л.А., Ушомирская А.И., Финкельштейн С.М., Пирумов А.И. Внутренние санитарно-технические устройства. Справочник проектировщика: в 3 ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Кн. 2 / под ред. Н.Н. Павлова, Ю.И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1992. 416 с.

Barkalov B.V., Pavlov N.N., Amirdzhanov S.S., Gritmitlin M.I., Moor L.F., Pozin G.M., Kreumer B.N., Rubchinskiy V.M., Sadovskaya T.I., Berezina N.I., Bychkova L.A., Ushomirskaya A.I., Finkel'tein S.M., Pirumov A.I. *Internal Sanitary Equipment: in 3 Parts. Part 3. Ventilation and Air Conditioning. Book 2*. Edited by N.N. Pavlov and Yu.I. Shiller. 4th ed., revised and enlarged. Moscow, Stroyizdat Publ., 1992. 416 p. (In Russ.).

3. Иванов А.Н., Белоусов В.Н., Смородин С.Н. Теплообменное оборудование предприятий. СПб., 2016. 184 с.

Ivanov A.N., Belousov V.N., Smorodin S.N. *Heat Exchange Equipment for Industrial Enterprises*. St. Petersburg, 2016. 184 p. (In Russ.).

4. Кочев А.Г., Сергиенко А.С. Аэродинамический расчет механических и гравитационных систем вентиляции. Н. Новгород: ННГАСУ, Деловая Полиграфия, 2015. 25 с.

Kochev A.G., Sergienko A.S. *Aerodynamic Calculation of Mechanical and Gravitational Ventilation Systems*. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Delovaya Poligraphiya Publ., 2015. 25 p. (In Russ.).

5. Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы: в 3 т. Т. II. Производство сульфатной целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 600 с.

Nepenin Yu.N. *Cellulose Technology: in 3 vol. Vol. II: Production of Sulphate Cellulose*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 600 p. (In Russ.).

6. Пасечник С.П., Торф А.И. Газоочистные установки растворителей плава содорегенерационных котлоагрегатов. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1977. 30 с.

Pasechnik S.P., Torf A.I. *Gas Cleaning Units for Smelt Dissolving Tanks in Soda Recovery Boilers*. Moscow, VNIPIEIllesprom Publ., 1977. 30 p. (In Russ.).

7. Патент № 2043444 РФ, МПК D21C 11/06. Устройство для регенерации тепла и химикатов из парогазовых выбросов растворителя плава содорегенерационного котлоагрегата: № 5056154/12: заявл. 29.07.1992; опубл. 10.09.1995 / Л.В. Романова, Е.А. Стасюк, В.Г. Родионов, И.И. Гогонин.

Romanova L.V., Stasyuk E.A., Rodionov V.G., Gogonin I.I. *A Device for the Regeneration of Heat and Chemicals from Steam-Gas Emissions of a Smelt Dissolving Tank in a Soda Recovery Boiler*. Patent RF, no. RU 2043444 BI, 1995. (In Russ.).

8. Сиваков В.П., Вураско А.В., Музыкантова В.И. Регенерация химикатов и тепла в содорегенерационных котлоагрегатах. Устройство и диагностирование. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 141 с.

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Muzykantova V.I. *Regeneration of Chemicals and Heat in Soda Recovery Boilers. Device and Diagnostics*. Yekaterinburg, Ural State Forestry University, 2015. 141 p. (In Russ.).

9. Смородин С.Н., Иванов А.Н., Белоусов В.Н. Содорегенерационные котлоагрегаты. СПб., 2010. 164 с.
Smorodin S.N., Ivanov A.N., Belousov V.N. *Soda Recovery Boilers*. St. Petersburg, 2010. 164 p. (In Russ.).
10. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 2. Производство полуфабрикатов. СПб.: Политехника, 2003. 663 с.
Technology of Pulp and Paper Production. In 3 volumes. Volume 1. Production of Semi-Finished Products. Part 2. Production of Semi-Finished Products. St. Petersburg, Politekhnika Publ., 2003. 663 p. (In Russ.).
11. Ahtila P., Ruohola T., Tamminen A. *Method and Apparatus for Preparing Green Liquor*. Patent no. Europäisches patentament EP 1 193 341 B1. 2005.
12. Das S.K., Biswas M.N. Studies on Ejector-Venturi Fume Scrubber. *Chemical Engineering Journal*, 2006, vol. 119, iss. 2–3, pp. 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.03.019>
13. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe. *Official Journal of the European Union*, L 152, 11.06.2008, pp.1–44.
14. Gamisans X., Sarra M., Lafuente F.J., Azzopardi B.J. The Hydrodynamics of Ejector-Venturi Scrubbers and Their Modelling by an Annular Flow/Boundary Layer Model. *Chemical Engineering Science*, 2002, vol. 57, iss. 14, pp. 2707–2718. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(02\)00171-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(02)00171-9)
15. Harry-Ngei N., Ubong I., Ede P.N. A Review of the Scrubber as a Tool for the Control of Flue Gas Emissions in a Combustion System. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 2019, vol. 4, iss. 11, pp. 1–4. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2019.4.11.1561>
16. Poling B.E., Prausnitz J.M., O’Connell J.P. *The Properties of Gases and Liquids*. New York, McGRAW-HILL, 2001. 803 p.
17. Sittig M. *Pulp and Paper Manufacture: Energy Conservation and Pollution Prevention (Pollution Technology Preview)*. Park Ridge, NJ, Noyes Data Corp. / Noyes Publ., 1977. 430 p.
18. Smook G.A. *Handbook for Pulp and Paper Technologists*. TAPPI Press, 2016. 438 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest