

УДК 550.72

ОБЗОР УСТАНОВОК И РЕАКТОРОВ ДЛЯ БАКТЕРИАЛЬНО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СУЛЬФИДНЫХ РУД И КОНЦЕНТРАТОВ**Иодис В.А.***ФГБУН Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, e-mail: iodisva@mail.ru*

В статье сделан обзор патентных документов по установкам и реакторам для бактериально-химического выщелачивания – аппарата для выщелачивания руд и концентратов С.И. Полькина и др., bioleaching apparatus and system Envirotech Corporation, установки для биохимического выщелачивания руд «Унипромедь», реактора Р.Д. Баттергема, А.В. Хоффманна, Н. Катсикаруса, установки биовыщелачивания D.W. Dew, P. Basson, bioleaching bioreactor with a system for injection and diffusion of air Romero-Miranda, José Antonio, ферментера для бактериального окисления сульфидных руд и концентратов ФГБОУ ВО «ЗабГУ», проанализированы конструкции устройств и реакторов, способы контроля и регулирования основных параметров, степени автоматизации, скорости процесса выщелачивания. На основании обзора и анализа предложена конструкция проточной реакторной установки, способная интенсифицировать процесс бактериально-химического выщелачивания. Предлагаемая конструкция установки включает контактный чан для загрузки измельченной руды, инокулята и питательной среды для бактерий, три проточных реактора с механическими мешалками и аэрацией. Предусматривается снабжение установки системой термостатирования и блоком управления с контрольно-измерительными приборами, размещенными в портах контактного чана и реакторов – рН-метр, Eh-метр, контактный термометр, тахометр, частотный преобразователь.

Ключевые слова: установка, реактор, бактериально-химическое выщелачивание, сульфидные руды, концентраты

OVERVIEW OF INSTALLATIONS AND REACTORS FOR BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING OF SULFIDE ORE AND CONCENTRATES**Iodis V.A.***Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: iodisva@mail.ru*

The article provides an overview of patent documents on installations and reactors for bacterial-chemical leaching – apparatus for leaching ores and concentrates Polkina S.I. et al., bioleaching apparatus and system Envirotech Corporation, units for biochemical leaching of ores «Unipromed», reactor Butterham R.D., Hoffmann A.V., Katsikarus N., bioleaching units Dew D.W., Basson P., bioleaching bioreactor with a system for injection and diffusion of air Romero-Miranda, José Antonio, fermenter for bacterial oxidation of sulfide ores and concentrates, FSBEI HE «TSU», the design of devices, methods of control and regulation of the main parameters, the degree of automation, and the speed of the process have been analyzed. Based on the review and analysis, a design of a flow-through reactor plant capable of intensifying the process of bacterial-chemical leaching is proposed. The proposed design of the installation includes a contact tank for loading crushed ore, inoculum and a nutrient medium for bacteria, three flow reactors with mechanical stirrers and aeration. It is planned to supply the installation with a thermostating system and a control unit with instrumentation located in the ports of the contact tank and reactors – a pH meter, an Eh meter, a contact thermometer, a tachometer, and a frequency converter.

Keywords: installation, reactor, bacterial-chemical leaching, sulfide ores, concentrates

Реакторное бактериально-химическое выщелачивание руд применяют с 1970-х гг. и представляет оно собой процесс в отдельных реакторах или в установках, состоящих из каскада реакторов [1–3]. Процесс, в сравнении с кучным или подземным способами выщелачивания, требует больших капитальных и эксплуатационных затрат, однако использование автоматизации и контроля параметров процесса позволяет интенсифицировать бактериально-химическое выщелачивание. В частности, обеспечивает тщательный контроль важных параметров процесса (окислительно-восстановительный потенциал, водородный показатель, температура, объемные и массовые расходы сред и т.д.). Продолжительность выщелачивания составляет несколько суток,

при этом из-за замкнутости процесса исключается загрязнение окружающей среды. В ряде случаев биовыщелачивание действует в постоянно-проточно-непрерывном режиме в нестерильных условиях, тем самым способствуя постоянной селекции тех видов и штаммов бактерий и архей, которые могут расти более эффективно. Крайне важно, что микроорганизмы всегда поддерживаются в фазе экспоненциального роста, обеспечивая интенсификацию извлечения ценных компонентов [4–6].

Целью работы является обзор зарубежных и российских патентных документов по установкам и реакторам для бактериально-химического выщелачивания сульфидных руд и концентратов. На основании обзора и анализа существующих изобретений

будет предложена конструкция реакторной установки, способная в наибольшей степени интенсифицировать процесс бактериально-химического выщелачивания.

Материалы и методы исследования

Для достижения цели работы были решены следующие задачи: анализ конструкций устройств и реакторов, способов контроля и регулирования основных параметров процесса бактериально-химического выщелачивания, степени автоматизации; влияние конструкции, степени автоматизации реакторов и устройств на скорость процесса; предложение устройства проточной реакторной установки, способной интенсифицировать процесс биохимического выщелачивания. При решении указанных задач применялись методы обобщения, систематизации и сравнительного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Одним из первых устройств для бактериально-химического выщелачивания руд является реактор Московского ордена Трудового Красного Знамени института стали и сплавов [7], включающий корпус реактора, разделенного камерными перегородками, пружинное устройство для спуска твердой и жидкой фаз пульпы реактора. В каждой из двух камер реактора имеет место передвижной эрлифт для перелива, перемешивания и насыщения кислородом воздуха пульпы. Между камерами реактора для перелива пульпы есть переливное отверстие. В каждой из двух камер предусмотрены передвижные перегородки для направления потока пульпы ко дну камер. Жидкие реагенты периодически подавались в верхнюю часть камеры реактора.

Реактор работает следующим образом – пульпа подается в первую камеру реактора и, заполняя ее, переливается во вторую камеру через переливное отверстие, заполняя которую выходит из реактора. Эрлифт за счет подачи воздуха забирает пульпу со дна реактора и нагнетает ее в его верхнюю часть. В результате работы эрлифтов, передвижных перегородок достигается интенсификация процесса бактериально-химического выщелачивания. Выпуск пульпы из реактора осуществляет пружинное устройство, выполненное в виде пружинного клапана.

Недостатком [7] является отсутствие автоматического регулирования параметров рН, температуры, плотности и скорости подачи пульпы, подаваемой на перемешивание, и насыщения кислородом воздуха пульпы.

Envirotech Corporation запатентовало реактор-канал (рис. 1), состоящий из системы параллельных, соединенных каналов (поз. 9) для переработки биовыщелачиванием металлосодержащих руд и концентратов [8]. В каналах предусматривалась аэрация кислородом воздуха. Подача воздуха должна осуществляться с помощью множества диффузоров (форсунок) (поз. 10), расположенных у дна каналов. Аэрация предусматривалась не только для обеспечения жизнедеятельности автотрофных бактерий (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*), но и для поддержания во взвешенном состоянии твердых частиц пульпы и биомассы. По утверждению разработчиков изобретения некоторая часть твердых частиц пульпы осаждалась вблизи диффузоров, что вело к засорению системы аэрации и выходу ее из строя. Поэтому Envirotech Corporation в своем изобретении предусмотрело передвижные механические мешалки (поз. 3–5) для снижения степени осаждения твердых частиц пульпы у диффузоров (форсунок). Кроме этого, конструкция реактора дает возможность рециркуляции пульпы с начала канала до его конца, что позволяет избежать «вымывания» пульпы. Чтобы исключить испарение кислотных и токсичных соединений со свободной поверхности канала, над ним была предусмотрена крышка в виде пузыря (поз. 2), накачиваемая воздухом от компрессора (поз. 1).

Несмотря на снижение капитальных затрат на осуществление биовыщелачивания с использованием реактор-канала [8], полностью предотвратить загрязнение окружающей среды кислотными и токсичными соединениями со свободной поверхности канала невозможно.

В 1994 г. «Унипромедь» получил патент на установку бактериально-химического выщелачивания руд [9]. На металлическом каркасе 9 (рис. 2) закреплены ферментер 7 (устройство для регенерации инокулята) и 4 перколятора 3. Для них предусмотрена система термостатирования, состоящая из рубашки нагрева, нагревательного элемента 1 и механической мешалки 2.

Для подачи бактериального раствора из ферментера в перколяторы с измельченной рудой через регулирующие клапаны 4 установка снабжена компрессором 5. Аэрация инокулята в ферментере обеспечивается мембранным насосом 8. Установка имеет блок управления с приборами – рН-метр, Eh-метр, кислородометр, измерители температуры, регулятор числа оборотов мешалок.

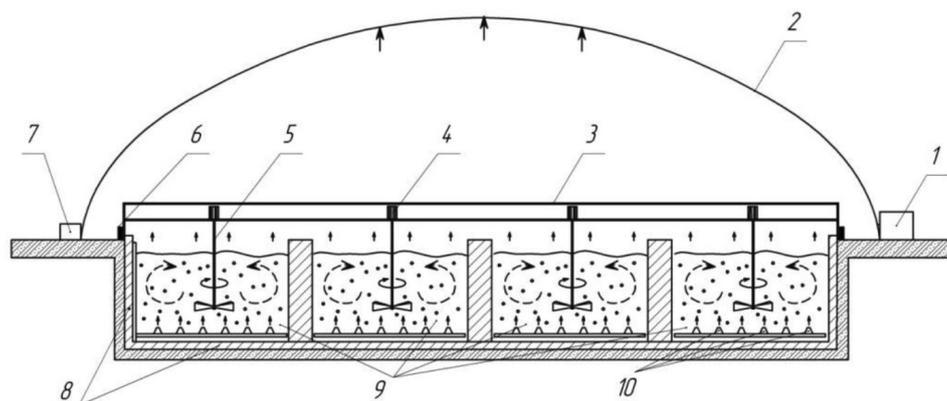


Рис. 1. Схема реактора-канала [8]: 1 – воздушный компрессор для поддержания крышки канала; 2 – крышка канала; 3 – перемещаемая вдоль канала стойка; 4 – электродвигатель мешалки; 5 – механическая мешалка; 6 – колеса стойки; 7 – воздушный компрессор для аэрации пульпы; 8 – стенка и дно канала, покрытое кислотоустойчивым материалом; 9 – каналы, составляющие реактор-канал; 10 – диффузоры (форсунки) для аэрации пульпы

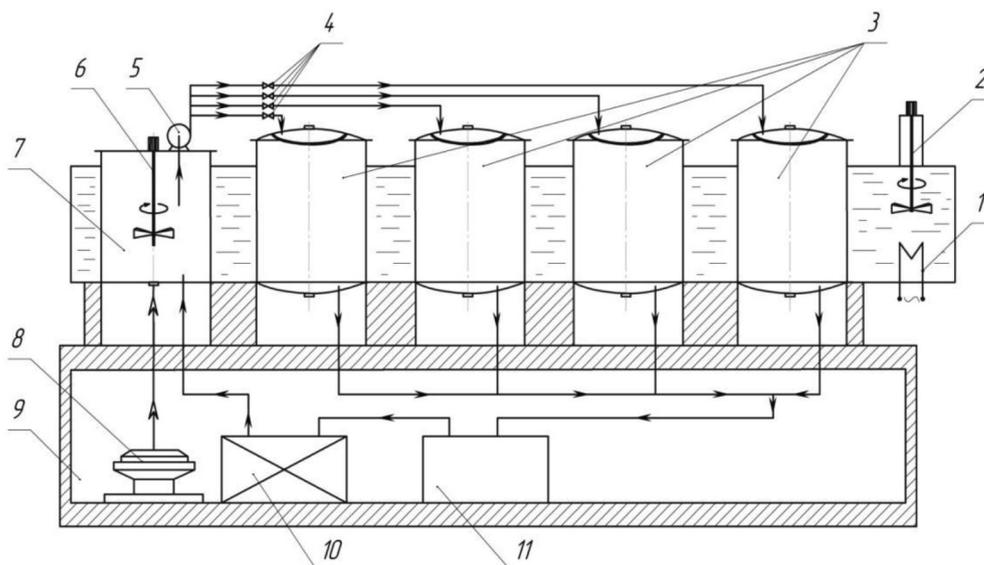


Рис. 2. Схема установки [9]: 1 – нагреватель; 2 – механическая мешалка; 3 – перколяторы; 4 – регулирующие клапаны; 5 – насос; 6 – механическая мешалка; 7 – ферментер; 8 – мембранный воздушный компрессор; 9 – металлический каркас; 10 – бак № 1; 11 – бак № 2

Как отмечают авторы изобретения [9], за счет автоматизации и контроля параметров процесса достигается интенсификация процесса бактериально-химического выщелачивания в 2–3 раза.

Р.Д. Баттергем, А.В. Хоффманн, Н. Катсикарус в 1999 г. предложили конструкцию реактора для бактериально-химического выщелачивания [10], содержащего внешнюю и внутреннюю камеры (рис. 3 (поз. 2, 7)), сопло Вентури (поз. 4), центробежный

насос (поз. 3), мешалку (поз. 5). Верхний и нижний части (концы) (поз. 1, 8) внутренней камеры открыты. Для ее аэрации пульпы используются центробежный насос и сопло Вентури. Насос обеспечивает циркуляцию жидкой фазы пульпы через сопло Вентури, где она смешивается с воздухом, и подает ее в верхнюю часть внутренней камеры. Подача обогащенной воздухом пульпы происходит над мешалкой и обеспечивает ее циркуляцию через нижнюю часть

внутренней камеры во внешнюю камеру и далее к центробежному насосу.

К недостаткам реактора [10] можно отнести отсутствие в устройстве термостатирования, автоматического регулирования параметров процесса.

D.W. Dew, P. Basson получили патент на установку по биовыщелачиванию с полной автоматизацией параметров аэрации, подачи пульпы в реактор, подачи кислорода и углекислого газа [11]. Установка (рис. 4) содержит реактор с принудительным перемешиванием (поз. 16), систему охлаждения реактора, насадки для аэрации (поз. 5), бак с пульпой (поз. 15), баллоны с воздухом (поз. 13), кислородом (O_2) (поз. 9), углекислым газом (CO_2) (поз. 8), клапаны подачи газов и регулирующие клапаны. Процесс биовыщелачивания проходит при температуре $> 40^\circ C$. Для контроля концентраций O_2 и CO_2 в пульпе реактора предусмотрены зонды (поз. 1) и (поз. 2), сигнал от которых передается на клапаны подачи газов, регулирующие клапаны. Для контроля концентраций O_2 и CO_2 над поверхностью пульпы также использованы зонды (поз. 3) и (поз. 4), сигнал от которых также поступает на клапаны подачи газов и регу-

лирующие клапаны. Система охлаждения предусмотрена для компенсации выделенной энергии окисления сульфидов. Для регулирования системы аэрации пульпы в установке используется регулирующий клапан (поз. 12). Подачу пульпы в реактор установки регулирует клапан – (поз. 14).

Установка [11] позволяет достичь более высоких скоростей реакции за счет автоматического регулирования подачи пульпы, воздуха, CO_2 и O_2 .

Известен биореактор для биовыщелачивания сульфидных руд и концентратов [12], в котором подача воздуха в пульпу осуществляется из отверстия, расположенного в валу мешалки. Биореактор включает корпус из нержавеющей стали, баффлы для турбулизации потока пульпы, механическую мешалку, нагревательные элементы, технологические отверстия для подачи пульпы в реактор и для выпуска газов. Как отмечают авторы изобретения, реактор может быть снабжен датчиками контроля параметров. Биореактор [12] позволяет непрерывно проводить процесс биовыщелачивания при давлении от 0,14 до 0,21 кг/м² и температуре 45–80 °С, осуществлять улавливание и очистку выходящих из него газов.

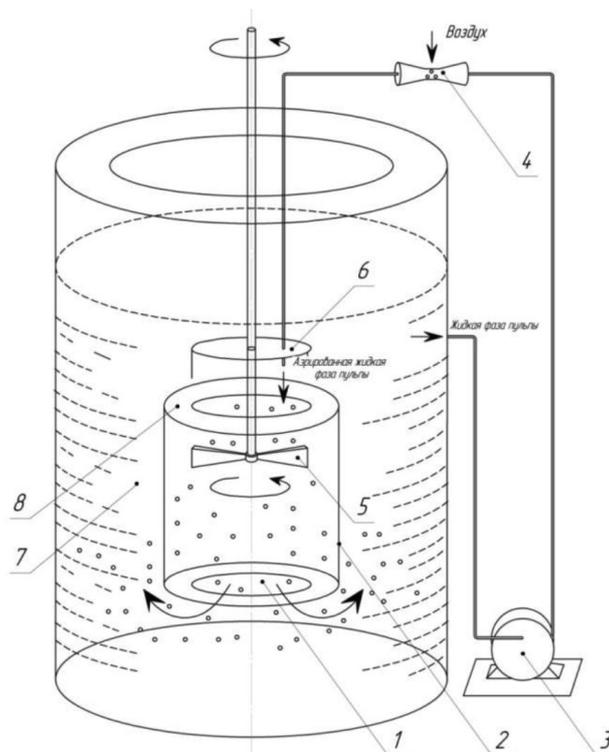


Рис. 3. Схема реактора [10]: 1 – нижний конец внутренней камеры (открытый); 2 – внутренняя камера; 3 – центробежный насос; 4 – сопло Вентури; 5 – мешалка; 6 – крышка внутренней камеры; 7 – внешняя камера; 8 – верхний конец внутренней камеры (открытый)

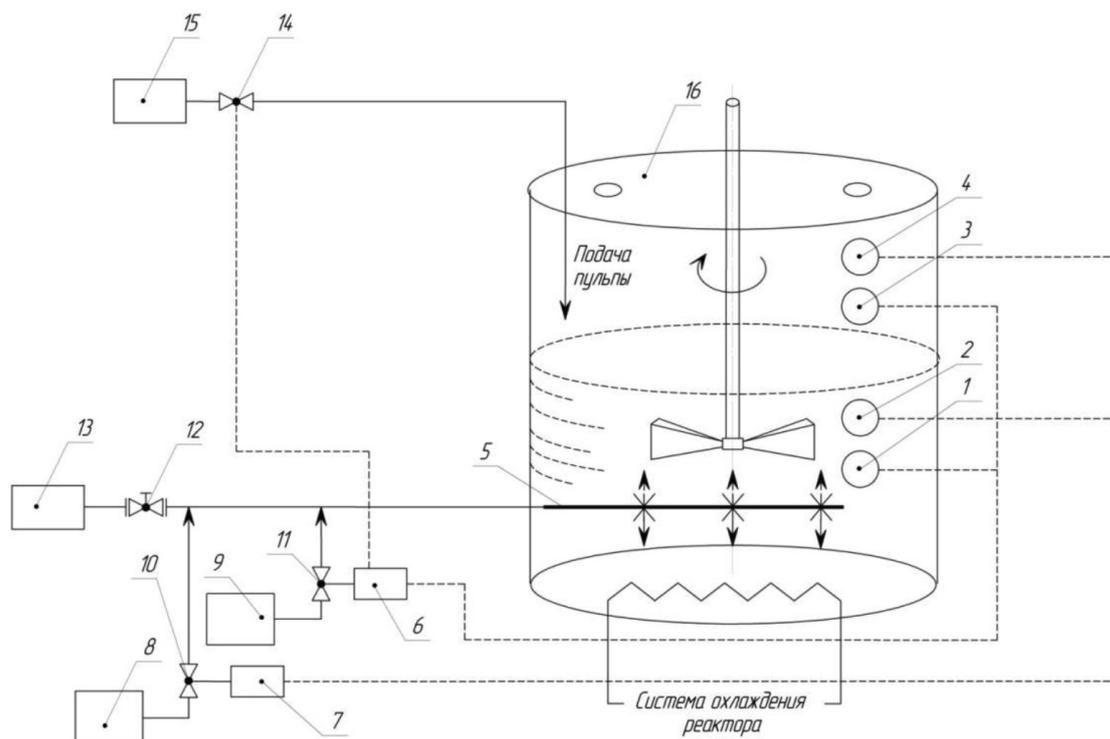


Рис. 4. Схема установки [11]: 1 – зонд концентрации O_2 в пульпе; 2 – зонд концентрации CO_2 в пульпе; 3 – зонд концентрации O_2 ; 4 – зонд концентрации CO_2 ; 5 – труба с насадками для аэрации; 6 – клапан подачи O_2 ; 7 – клапан подачи CO_2 ; 8 – баллон с CO_2 ; 9 – баллон с O_2 ; 10, 11, 12, 14 – регулирующие клапаны; 13 – баллон с воздухом; 15 – бак с пульпой; 16 – реактор

К недостаткам изобретения [12] можно отнести невозможность удаления твердой фазы пульпы с нижней части биореактора, низкую степень аэрации пульпы кислородом воздуха – 0,0035 г/л ввиду низкой производительности аэратора.

В 2018 г. ФГБОУ ВО «ЗабГУ» предложило модель реактора-ферментера для бактериального окисления сульфидных руд и концентратов [13]. Сульфидный продукт, подлежащий окислению, подается через загрузочный патрубок в рабочее пространство реактора-ферментера, предварительно заполненного бактериальным раствором, где перемешивается механической мешалкой. Одновременно с перемешиванием в пульпу подается воздух, расход которого контролируется расходомером. Высокая степень аэрации обеспечивается наличием четырех аэрационных блоков на корпусе с микроотверстиями по всей поверхности. Реактор-ферментер снабжен нагревательным элементом в виде закрытой спирали и вентилятором охлаждения. Для поддержания заданной температуры предусмотрено два режима работы – охлаждение и нагревание. В режиме охлаждения отключается

нагревательный элемент и включается вентилятор охлаждения, который засасывает и нагнетает охлаждающий реактор воздух. В режиме нагрева отключается вентилятор охлаждения, на спираль нагревательного элемента подается напряжение и пульпа в реакторе нагревается. Контроль технологических параметров пульпы осуществляется блоком управления и терморегуляции. Для поддержания и регулирования значения водородного показателя среды пульпы, а также подачи реагентов модификаторов предусмотрен насос-дозатор. Окисленный в результате биоокисления продукт в потоке самотеком сливается через разгрузочный патрубок.

Достоинством полезной модели [13] является повышение содержания растворенного кислорода в пульпе и, как следствие, увеличение скорости окисления сульфидных минералов – 90%.

Недостатком данного реактора-ферментера [13] является отсутствие плавного регулирования и поддержания температуры пульпы из-за применения нагревательного элемента в виде закрытой спирали и вентилятора охлаждения.

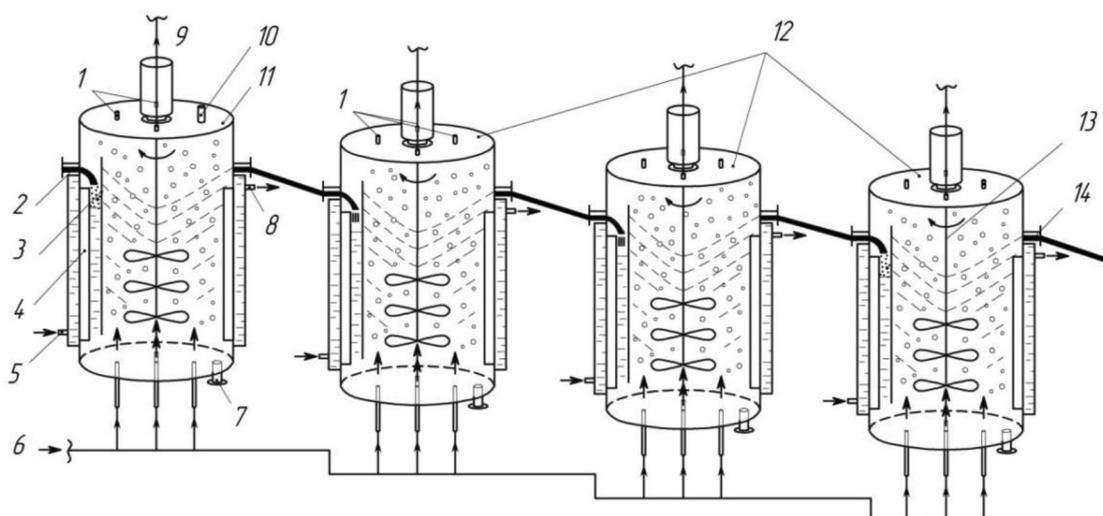


Рис. 5. Схема предлагаемой к проектированию установки: 1 – порты для датчиков; 2 – патрубок подачи измельченной руды; 3 – перегородка, защищающая от «залива» пульпы входа в реактор; 4 – баффы; 5 – вход нагревающей воды в рубашку реакторов; 6 – вход воздуха на аэрацию и перемешивание; 7 – патрубок слива пульпы; 8 – выход воды из рубашки реакторов; 9 – выход воздуха после аэрации; 10 – патрубок для подачи инокулята и питательной среды; 11 – контактный чан; 12 – реакторы; 13 – механическая мешалка; 14 – патрубок для выхода продуктивного раствора

Заключение

В результате анализа зарубежных и российских патентов по установкам и реакторам для бактериально-химического выщелачивания сульфидных руд и концентратов были выявлены их недостатки и достоинства. С их учетом предлагается к проектированию установка (рис. 5), включающая контактный чан 11 для загрузки измельченной руды 2, инокулята 10 и питательной среды для бактерий, три проточных реактора 12 с механическими мешалками 13. Аэрация предусматривается не только для обеспечения жизнедеятельности бактерий, но и для поддержания во взвешенном состоянии твердых частиц пульпы и биомассы. Установка будет иметь блок управления с приборами, размещенными в портах контактного чана и реакторов – рН-метр, Eh-метр, контактный термометр, тахометр, частотный преобразователь. Также установка будет снабжена системой термостатирования – циркуляция подогревающей воды через рубашку нагрева контактного чана и реакторов.

Список литературы

1. Хайнасова Т.С. Процессы биовыщелачивания сульфидных руд, использующие реакторы с механическим пе-

ремешиванием // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). М.: Издательство «Горная книга», 2020. № 12 (специализированный выпуск 46). С. 202–210. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-46-202-210.

2. Хайнасова Т.С. Реакторы с механическим перемешиванием в бактериально-химическом выщелачивании // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). М.: Издательство «Горная книга», 2020. № 12 (специализированный выпуск 46). С. 211–224. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-46-211-224.

3. Балыков А.А., Левенец О.О., Хайнасова Т.С. Проточный биореактор для исследования бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд и концентратов // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 383–387. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.383.

4. Хайнасова Т.С. Факторы, влияющие на бактериально-химические процессы переработки сульфидных руд // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 47–54. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.47.

5. Иодис В.А. Аппараты для бактериально-химического выщелачивания сульфидных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). М.: Издательство «Горная книга», 2020. № 12 (специализированный выпуск 46). С. 128–138. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-12-46-128-138.

6. Левенец О.О., Хайнасова Т.С., Балыков А.А., Позолотина Л.А. Биовыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды с вариациями питательной среды для хемолитотрофных микроорганизмов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2», 2015. № 11. С. 291–296.

7. А.с. 707985 СССР, МПК С 22 В 3/02. Аппарат для выщелачивания руд и концентратов / Полькин С.И., Адамов Э.В., Панин В.В., Дятлов В.Д., Гришин С.И. 2514363/22 – 02; заявлено 01.08.77; опубл. 05.01.80, Бюл. 1. С. 3.

8. Emmett R.C., O'Connor L.T., Brox G.H. Bioleaching apparatus and system // Patent US № 4968008. Assignee Envirotech Corporation. 1990. Appl. No.: 248,620.

9. Яшина Г.М., Белый А.В., Штоль А.А., Потылицин Н.В., Шевелева Л.Д., Кривошеев Е.П. Установка для биохимического выщелачивания руд // Патент РФ № 2011691. Патентообладатель Уральский научно-исследовательский и проектный институт медной промышленности «Унипромедь». 1994.

10. Баттергем Р.Д., Хоффманн А.В., Катсикарус Н. Реактор // Патент РФ № 2139131. Патентообладатель Текнолджикал Рисорсез Пти Лимитед (AU). 1999.

11. Dew D.W., Basson P. Sulfidimineraalien bioliuotus – Biolakning av sulfidmineraler. Patent FI № 122564 B. Assignee Billiton Intellectual Property B.V. 2012.

12. Sanchez-Vazquez B., Estrada-de-los-Santos F., Buendia-Cachu, E.D., Monter-Valenzuela U. Bioleaching bioreactor with a system for injection and diffusion of air. Patent WO № 2013/057557 A1. Assignee Romero-Miranda J.A. 2013.

13. Мязин В.П., Баранов В.В., Соболев А.В. Ферментер для бактериального окисления сульфидных руд и концентратов // Патент РФ № 179139. Патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Забайкальский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ЗабГУ»). 2018. Бюл. № 13.