

УДК 629.039.58:614.83

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПАСНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ УСТАНОВОК ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

Головин А.Д., Трунова И.Г., Пачурин Г.В.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный университет им. Р.А. Алексеева»,  
Нижегород, e-mail: pachuringv@mail.ru

Развитие промышленного производства сопровождается постоянным увеличением риска возникновения аварий и катастроф и возрастанием масштабов их последствий. Часто причинами чрезвычайных ситуаций техногенного характера являются аварии на объектах, использующих опасные технологии. К таким объектам относят, прежде всего, те, на которых находятся сжиженные и сжатые газы, опасные химические вещества, взрывопожароопасные вещества, опасные биологические вещества и источники ионизирующих излучений. В результате аварий могут возникать взрывы, пожары, токсические и радиационные поражения. Производство водорода методом электролиза воды относится к категории взрывопожароопасных производств и обладает признаками опасного производственного объекта. С целью определения уровня опасности выполнен расчет энергетических характеристик опасностей электролизных установок производства водорода блочного и стационарного типа. Приведенные сравнительные данные показывают, что блочная электролизная установка нового поколения (модульная) является более безопасной в эксплуатации и, следовательно, более перспективной для использования в промышленности.

**Ключевые слова:** электролизные установки, газообразный водород, энергетический потенциал взрывоопасности, избыточное давление, величина пробит-функции, импульс волны давления, интенсивность теплового излучения, нижний концентрационный предел распространения пламени

## COMPARATIVE ANALYSIS OF ENERGY PERFORMANCE HAZARDS ELECTROLYSIS PLANTS PRODUCE HYDROGEN

Golovin A.D., Trunova I.G., Pachurin G.V.

Nizhny Novgorod State University R.A. Alekseev, Nizhny Novgorod, e-mail: pachuringv@mail.ru

The development of industrial production is accompanied by a constant increase in the risk of accidents and disasters, and increase the scale of their impact. Often the causes of man-caused emergencies are accidents at facilities using hazardous technologies. These objects include, above all, those which are liquefied and compressed gases, hazardous chemicals, explosive substances, hazardous biological substances and sources of ionizing radiation. As a result, accidents may occur explosions, fires, toxic and radiation damage. Production of hydrogen by electrolysis of water is classified as explosive productions and has characteristics of hazardous production facilities. In order to determine the level of danger calculated the energy characteristics of the dangers of electrolytic hydrogen production plant block and fixed. These comparative data show that the block of new generation electrolysis installation (modular) is safer to use and therefore more promising to use in industry.

**Keywords:** electrolysis plants, hydrogen gas, the energy potential of the explosion, the overpressure, the value of the probit function, impulse pressure wave, the intensity of the thermal radiation, the lower flammability limit

Современный человек постоянно находится в условиях природных, технических, антропогенных, экологических, социальных и других опасностей [3, 4]. При этом с бурным развитием техники опасность растет быстрее, чем способность человека противостоять ей. К тому же человек привыкает к опасности и начинает пренебрегать ею [5, 11, 12]. Развитие промышленного производства сопровождается постоянным увеличением риска возникновения аварий и катастроф и возрастанием масштабов их последствий [8, 10]. Часто причинами чрезвычайных ситуаций техногенного характера являются аварии на объектах, использующих опасные технологии. К таким объектам относят, прежде всего, те, на которых находятся сжиженные и сжатые газы, опасные химические вещества, взрывопо-

жароопасные вещества, опасные биологические вещества и источники ионизирующих излучений. В результате аварий могут возникать взрывы, пожары, токсические и радиационные поражения.

В связи с этим обеспечение промышленной безопасности опасных производственных объектов, которое предполагает системный подход к принятию политических решений, процедур и практических мер по предупреждению или уменьшению опасности промышленных аварий для жизни человека, заболеваний или травм, ущерба имуществу и окружающей среде является актуальной задачей [9].

Обеспечение безопасной эксплуатации опасных производственных объектов направлено прежде всего:

– на предупреждение аварий на опасных производственных объектах;

– обеспечение готовности организаций, эксплуатирующих опасные производственные объекты, к локализации и ликвидации последствий указанных аварий.

Газообразный водород широко применяется в различных отраслях промышленности для синтеза таких продуктов, как аммиак, метиловый спирт, высшие спирты, углеводороды, хлористый водород, и других веществ, а также как восстановитель при получении многих органических соединений, в том числе пищевых жиров. В металлургии водород используется для получения металлов, создания защитной среды при обработке металлов и сплавов. В нефтепереработке – для гидроочистки нефтяных фракций и смазочных масел, гидрирования и гидрокрекинга нефтяных дистиллятов, нефтяных остатков и смол, в электронной промышленности – для создания восстановительной атмосферы. Водород применяется также в стекольной промышленности, производстве изделий из кварцевого стекла и других с использованием водородно-кислородного пламени, для атомно-водородной сварки тугоплавких сталей и сплавов, для охлаждения турбогенераторов, как восстановитель в топливных элементах. В небольших количествах водород потребляется предприятиями фармацевтической, металлообрабатывающей и других отраслей промышленности.

Получение водорода в промышленности осуществляется несколькими способами. При этом широко распространенным способом получения водорода является метод, основанный на электролизе воды. Данный метод применяется в практике вследствие простоты и надежности электролизных установок, высокой чистоты генерируемых газов (до 99,99%), возможности получения газов под высоким давлением непосредственно на штуцерах электролизера, высокой степени автоматизации технологического процесса и большого ресурса установки.

Производство водорода и кислорода методом электролиза воды относится к категории взрывопожароопасных производств и, согласно Федеральному закону от 21.07.1997 № 116-ФЗ, к категории опасных производственных объектов.

Одним из основных отечественных производителей электролизных установок является Уральский завод химического машиностроения (ОАО «Уралхиммаш», г. Екатеринбург), который выпускает электролизеры для получения водорода

и кислорода с середины 1950-х гг. Однако большая металлоемкость, значительное энергопотребление, наличие асбестового полотна в качестве материала диафрагмы делают эти электролизеры неконкурентоспособными. Для получения относительно небольших объемов водорода и кислорода все большее распространение получают зарубежные установки, состоящие из двух блоков: источника тока и самого электролизера. Весовые и массогабаритные характеристики в десятки раз ниже аналогичных по производительности отечественных, поэтому они не требуют строительства отдельных зданий, поставляются полностью собранными в виде контейнеров.

Целью данной работы является сравнительный анализ энергетических характеристик опасностей электролизных установок получения водорода. Для этого проводится оценка уровня опасности технологического процесса получения водорода, выбор типа оборудования и отключающих устройств, средств контроля, управления и противоаварийной защиты производится для отдельных технологических блоков. Для каждого технологического блока определяется расчетная категория его взрывоопасности. Одним из таких технологических блоков является электролизная установка.

Принцип действия стационарных и блочных электролизных установок одинаков. Производство основано на процессе разложения воды постоянным электрическим током. При этом на катоде выделяется газообразный водород, на аноде образуется кислород. Для повышения электропроводности воды и обеспечения требуемых условий для прохождения электрического тока в ней растворяется щелочь (КОН или NaOH). Водный раствор щелочи (электролит) является основным сырьем для получения электролитических газов. Убыль воды в результате электродных процессов и образование водорода и кислорода в электролите постоянно пополняется. Давление в электролизерах составляет от атмосферного до 4,0 МПа, производительность 4–500 м<sup>3</sup>/ч, расход электроэнергии 5,1–5,6 кВт×ч на 1,0 м<sup>3</sup> водорода.

Технические характеристики стационарных электролизных установок типа СЭУ производства ОАО «Уралхиммаш» и блочной электролизной установки получения водорода и кислорода модели ERREDUE G16 производства фирмы «ERREDUES R.L.» (Италия) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики электролизных установок

Наименование параметра	Модель электролизной установки				
	СЭУ-4М	СЭУ-10	СЭУ-20	СЭУ-40	ERREDUE G16
Количество ячеек, шт.	30	25	50	–	120
Сила тока, подводимая к электролизеру, А:					
– номинальная	165	1000	1000	1000	90
– максимальная	330	–	–	–	125
Напряжение на электролизере, В	60–72	50–55	105	215	–
Напряжение на одной ячейке электролизера, В	2,0–2,4	2,1	2,1	–	–
Рабочее давление, МПа	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Рабочая температура электролита, °С	80 ± 5	80 ± 5	80 ± 5	80 ± 5	55–60
Чистота газов, %:					
– водорода	99,0	99,7	99,7	99,7	99,5
– кислорода	98,0	99,5	99,5	99,5	99,0 – 99,5
Производительность, нм <sup>3</sup> /ч:					
– по водороду	2–4	10	20,50	41,0	10,66
– по кислороду	1–2	5	10,25	20,5	5,33
Габаритные размеры, мм:					
– длина	1700	1650	2400	4100	1800
– ширина	610	1000	1060	1060	1000
– высота	830	1300	1780	1780	2000
Вместимость электролизера, м <sup>3</sup>	0,16	0,35	0,69	1,0	0,09
Масса электролизера, кг	1290	3305	4720	7435	1300
Масса электролизера с комплектующим технологическим оборудованием, кг	10578	22596	23390	27335	2075

Для определения энергетических характеристик опасностей электролизных установок получения водорода были выбраны три установки ERREDUE G16, СЭУ 20 и СЭУ40, как наиболее широко распространенные.

Энергетический потенциал взрывоопасности  $E$  (кДж) определяется полной энергией сгорания парогазовой фазы, находящейся в технологическом блоке, с учетом величины работы её адиабатического расширения, а также величины энергии полного сгорания испарившейся жидкости с максимально возможной площади её пролива по формуле [7]

$$E = E_1' + E_2' + E_1'' + E_2'' + E_3'' + E_4'', \quad (1)$$

где  $E_1'$  – суммарная энергия адиабатического расширения  $A$  (кДж) и сгорания парогазовой фазы, находящейся в блоке, кДж;  $E_2'$  – энергия сгорания водорода, поступающего к разгерметизированному участку от смежных объектов (блоков), кДж;  $E_1''$  – энергия сгорания парогазовой среды, образующейся за счет энергии перегрева жидкой фазы рассматриваемого блока и поступающего от смежных блоков, кДж;  $E_2''$  – энергия сгорания парогазовой среды, образующейся из жидкой фазы за счет тепла экзотермических реакций, не прекращающихся при аварий-

ной разгерметизации, кДж;  $E_3''$  – энергия сгорания парогазовой среды, образующейся из жидкой фазы за счет теплопритока от внешних теплоносителей, кДж;  $E_4''$  – энергия сгорания парогазовой среды, образующейся из пролитой на твердую поверхность жидкой фазы за счет теплообмена с окружающей средой (подстилающей поверхностью и воздухом), кДж.

Расчет для блочной установки ERREDUE G16 показал, что энергетический потенциал взрывоопасности электролизера составляет 20441 кДж.

Общая масса газов взрывоопасного облака  $m$ , приведенная к единой удельной энергии сгорания, равной 46000 кДж/кг:

$$m = E/46000 = 20441/46000 = 0,444 \text{ кг.}$$

Относительный энергетический потенциал взрывоопасности  $Q_B$  технологического блока рассчитывали по формуле [7]

$$Q_B = \frac{1}{16,534} \cdot \sqrt[3]{E}. \quad (2)$$

По полученной величине  $Q_B = 1,65$  была определена категория взрывоопасности электролизного блока как III [7].

Степень пожарной опасности технологического процесса, в котором возможен

взрыв газа, оценивается следующими расчетами для различных ситуаций:

- расчет избыточного давления, развиваемого при сгорании газовой смеси в помещении;
- расчет горизонтальных размеров зоны, ограниченной нижним концентрационным пределом распространения пламени (НКПР);
- расчет избыточного давления при сгорании газовой смеси в открытом пространстве;
- расчет интенсивности теплового излучения и поражающего воздействия «огненного шара».

Оценка количественных показателей последствий воздействия поражающих факторов взрыва и пожара для различных сценариев позволяет определить их влияние на производственный персонал, попавший в опасную зону.

Для оценки пожарной опасности технологического процесса расчетным путем определяется избыточное давление, развиваемое при сгорании водорода в помещении. По величине избыточного давления определяется возможная степень повреждения здания. Типичные предельно допустимые значения избыточного давления с точки зрения повреждения зданий приведены в табл. 2 [1].

**Таблица 2**

Типичные предельно допустимые значения избыточного давления с точки зрения повреждения зданий

Степень поражения	Типичные предельно допустимые значения избыточного давления, кПа
Полное разрушение зданий	100,0
50% разрушение зданий	53,0
Средние повреждения зданий	28,0
Умеренные повреждения зданий (повреждение внутренних перегородок, рам, дверей и т.д.)	12,0
Нижний порог повреждения человека волной давления	5,0
Малые повреждения (разбита часть остекления)	3,0

Избыточное давление  $\Delta P$ , развиваемое при сгорании водорода в электролизной установке, определяется по формуле [1]

$$\Delta P = (P_{\max} - P_o) \frac{mz}{V_{\text{св}} \rho_{\text{H}_2}} \cdot \frac{100}{C_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{K_{\text{н}}}, \quad (3)$$

где  $P_{\max}$  – максимальное давление, развиваемое при сгорании стехиометрической водородовоздушной смеси в замкнутом объеме, кПа, для водорода  $P_{\max} = 730$  кПа [4];  $P_o$  – начальное давление, кПа, допускается принимать  $P_o = 101$  кПа;  $m$  – масса горючего газа (водорода), вышедшего в результате расчетной аварии в помещение,  $m = 0,169$  кг;  $z$  – коэффициент участия водорода в горении, для водорода  $z = 1,0$  [1];  $V_{\text{св}}$  – свободный объем помещения, определяемый как разность между объемом помещения и объемом, занимаемым технологическим оборудованием, допускается принимать условно равным 80% геометрического объема помещения  $V_{\text{св}} = 1160$  м<sup>3</sup>; (для расчетов выбран среднестатистический объем помещения, в котором могут быть размещены установки такого типа)  $\rho_{\text{H}_2}$  – плотность газов при расчетной температуре  $t_p$  вычисляется по формуле

$$\rho_{\text{H}_2} = \frac{M}{V_o (1 + 0,00367 t_p)}, \quad (4)$$

где  $M$  – молекулярная масса водорода,  $M = 2,016$  кг/кмоль;  $V_o$  – мольный объем,  $V_o = 22,413$  м<sup>3</sup>/кмоль;  $t_p$  – расчетная температура воздуха в помещении,  $t_p = 25$  °С,

$$\rho_{\text{H}_2} = \frac{2,016}{22,413 (1 + 0,00367 \cdot 25)} = 0,0824 \text{ кг/м}^3;$$

$C_{\text{ст}}$  – стехиометрическая концентрация газа, % (об.), вычисляемая по формуле

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,8\beta}, \quad (5)$$

где  $\beta = n_c + \frac{n_{\text{н}} - n_x}{4} - \frac{n_o}{2}$ ;  $n_c, n_{\text{н}}, n_o, n_x$  – число атомов С, Н, О и галогенов в молекуле горючего газа, в данном случае  $\beta = \frac{2}{4} = 0,5$ ;

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,8 \cdot 0,5} = 29,4;$$

$K_{\text{н}}$  – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения, допускается  $K_{\text{н}} = 3$ .

Расчитанное избыточное давление составило  $\Delta P = 1,26$  кПа, что означает, что избыточное давление  $\Delta P$ , развиваемое при сгорании водорода в помещении электролизного зала, может привести к малым повреждениям здания и не превысит нижний порог повреждения человека волной давления.

Определив массу парогазов, участвующих во взрыве [7], рассчитали величину тротилового эквивалента, которая составила 5,27 кг.

Радиус зоны разрушения в общем виде определяется выражением

$$R = K \frac{\sqrt[3]{W_T}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_T}\right)^2\right]^{1/6}} = KR_o, \quad (6)$$

где  $K$  – безразмерный коэффициент, характеризующий воздействие взрыва на объект [7].

$$R_o = \frac{\sqrt[3]{5,27}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{5,27}\right)^2\right]^{1/6}} = 0,206 \text{ м.}$$

Результаты расчета приведены в табл. 3

Расчет горизонтальных размеров зон, ограничивающих газоздушные смеси с концентрацией горючего выше нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР), при авариях поступления горючего газа в открытое пространство выполнен в соответствии с [6].

Горизонтальные размеры зоны  $R_{\text{НКПР}}$  ограничивающие область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел распространения пламени ( $C_{\text{НКПР}} = 4,0$ ), вычисляются по формуле

$$R_{\text{НКПР}} = 14,5632 \left( \frac{m_r}{\rho_r C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,333}, \quad (7)$$

где  $m_r$  – масса поступивших в открытое пространство горючих газов в аварийной ситуации;  $\rho_r$  – плотность горючего газа при расчетной температуре  $t_p$  ( $t_p = 25^\circ\text{C}$ ).

Радиус воздействия высокотемпературных продуктов сгорания газоздушной смеси в открытом пространстве  $R_F$  рассчитывается по формуле [6]

$$R_F = 1,2R_{\text{НКПР}} \quad (8)$$

При расчете рассматривается случай, когда масса истекающего газа при разгерметизации оборудования и трубопроводов является наибольшей. Величины этих зон составили соответственно 58 и 69,6 м.

Для оценки вероятности поражения человека избыточным давлением при сгорании газоздушной смеси в открытом пространстве на расстоянии  $r$  от эпицентра были рассчитаны избыточное давление и величина пробит-функции. Избыточное давление  $\Delta P$ , развиваемое при сгорании газоздушной смеси, рассчитывается по формуле [6]

$$\Delta P = P_o = \left( \frac{0,8m_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + \frac{3m_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + \frac{5m_{\text{пр}}}{r^3} \right), \quad (9)$$

где  $P_o$  – атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа);  $r$  – расстояние от геометрического центра газоздушного облака, м (принимается  $r = 30$  м);  $m_{\text{пр}}$  – приведенная масса газа, кг.

$$\Delta P = 101 \left( \frac{0,8 \cdot 55,05^{0,33}}{30} + \frac{3 \cdot 55,05^{0,66}}{30^2} + \frac{5 \cdot 55,05}{30^3} \right) = 15,88 \text{ кПа.}$$

Импульс волны давления  $i$  рассчитывается по формуле [6]

$$i = \frac{123m_{\text{пр}}^{0,66}}{r} = \frac{123 \cdot 55,05^{0,66}}{30} = 57,74 \text{ Па} \cdot \text{с.} \quad (10)$$

**Таблица 3**

Зоны разрушения при сгорании водорода в электролизной установке

Класс зоны разрушения	$\Delta P$ , кПа	Радиус зоны разрушения		Вероятные последствия, характер повреждений зданий и сооружений
		$K$	$R$ , м	
1	$\geq 100$	3,8	0,783	Полное разрушение зданий массивными стенами
2	70	5,6	1,154	Разрушение стен кирпичных зданий толщиной в 1,5 кирпича; перемещение цилиндрических резервуаров; разрушение трубопроводных эстакад, зона 50% разрушений
3	28	9,6	1,979	Разрушение перекрытий промышленных зданий; разрушение промышленных стальных несущих конструкций; деформации трубопроводных эстакад
4	14	28	5,772	Разрушение перегородок и кровли зданий; повреждение стальных конструкций каркасов, ферм
5	$\leq 2$	56	11,544	Граница зоны повреждений зданий; частичное повреждение остекления

Для  $r = 58$  м ( $R_{\text{НКПР}} = 58$  м) рассчитываем избыточное давление:

$$\Delta P = 101 \left( \frac{0,8 \cdot 55,05^{0,33}}{58} + \frac{3 \cdot 55,05^{0,66}}{58^2} + \frac{5 \cdot 55,05}{58^3} \right) = 6,64 \text{ кПа};$$

$$i = \frac{123 \cdot 55,05^{0,66}}{58} = 29,88 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

По величине избыточного давления  $\Delta P$  и импульсу волны давления  $i$  согласно методике, приведенной в [6] определяется условная вероятность поражения человека избыточным давлением при сгорании газозооной смеси на открытом пространстве на расстоянии  $r$  от эпицентра. Исходя из значений  $\Delta P$  и  $i$  вычисляется величина пробит-функции  $Pr$  по формулам

$$Pr = 5 - 0,26 \ln(V) \quad (11)$$

$$V = \left( \frac{17500}{P} \right)^{8,4} + \left( \frac{290}{i} \right)^{9,3}, \quad (12)$$

где  $\Delta P$  – избыточное давление, Па;  $i$  – импульс волны давления, Па·с.

Для расстояния  $r = 30$  м:

$$Pr = 5 - 0,26 \cdot \ln(3,3 \cdot 10^6) = 1,1.$$

Используя рассчитанное значение пробит-функции  $Pr$  по таблице [6] определяется условная вероятность поражения человека, которая для расстояния  $r = 30$  м практически равна нулю, то есть поражение человека маловероятно.

Была определена доза теплового излучения. Для ее оценки провели расчет интенсивности теплового излучения «огненного шара»  $q$  по формуле [2]

$$q = E_f F_q \tau \text{ (кВт/м}^2\text{)}, \quad (13)$$

где  $E_f$  – среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени, кВт/м<sup>2</sup>, допускается принимать  $E_f = 450$  кВт/м<sup>2</sup>;  $F_q$  – угловой коэффициент облученности;  $\tau$  – коэффициент пропускания атмосферы.

Время существования «огненного шара»  $t_s$ :

$$t_s = 0,92 m^{0,303} = 0,92 \cdot 20,89^{0,303} = 2,3 \text{ с}. \quad (14)$$

Коэффициент пропускания атмосферы  $t$  для «огненного шара» определяется по формуле [4]

$$\tau = \exp \left[ -7,0 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \sqrt{r^2 + H^2} - Ds/2 \right) \right]; \quad (15)$$

$$\tau = \exp \left[ -7,0 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \sqrt{32^2 + 7,2^2} - 14,4/2 \right) \right] = 0,98.$$

Интенсивность теплового излучения «огненного шара»:

$$q = 450 \cdot 0,0172 \cdot 0,98 = 7,6 \text{ кВт/м}^2.$$

Доза теплового излучения  $Q$  рассчитывается по формуле [2]

$$Q = q t_s = 7600 \cdot 2,3 = 1,75 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^2. \quad (16)$$

Ожог 1-й степени у человека имеет место при дозе теплового излучения  $Q = 1,2 \cdot 10^5 = \text{Дж/м}^2$ , то есть в данном случае ожоги исключены.

Энергетические характеристики взрыва в электролизном зале при разгерметизации электролизеров различного типа приведены в табл. 4.

Таблица 4

Энергетические характеристики опасностей электролизных установок

Наименование показателя	Блочная электролизная установка получения водорода и кислорода ERREDUE G16	Электролизер типа СЭУ-20	Электролизер типа СЭУ-40
Производительность по водороду, нм <sup>3</sup> /ч	10,66	20	40
Относительный энергетический потенциал взрывоопасности	1,65	4,1	4,67
Радиус зоны разрушения для 3 класса, м	2,0	11,9	15,7
Общая масса газов взрывоопасного облака, приведенной к единой удельной энергии сгорания, кг	0,444	6,83	9,98
Тротилловый эквивалент взрыва	5,27	69,5	108,1
Избыточное давление взрыва в помещении, кПа	1,3	21,0	30,8
Объем электролита в установке, м <sup>3</sup>	0,090	0,69	1,0

Следует отметить, что концентрация водорода при поступлении в помещение из установки типа СЭУ может достигнуть 4,3% (об.) (то есть выше НКПР).

В сравнимых условиях для рассматриваемой блочной электролизной установки этот показатель может достигнуть только 0,17% (об.).

### Заключение

Сравнительный анализ энергетических характеристик опасностей электролизных установок показал, что блочная электролизная установка нового поколения (модульная) является более безопасной в эксплуатации и, следовательно, более перспективной для использования в промышленности.

### Список литературы\

1. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. – URL: [http://bolid.ru/files/551/729/h\\_ca36ecf2c90a336fa04d1fea84e86869](http://bolid.ru/files/551/729/h_ca36ecf2c90a336fa04d1fea84e86869).
2. Корольченко А.Я., Корольченко Д.А. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Асс. «Пожнаука», 2004. – Ч. I. – 713 с.
3. Пачурин Г.В. Производственный травматизм. Монография / Г.В. Пачурин, Т.И. Курагина, Н.И. Щенников. – Издатель LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany, 2012. – 201 с.
4. Пачурин Г.В., Елькин А.Б., Миндрин В.И. и др. Основы безопасности жизнедеятельности: учеб. пособие / Г.В. Пачурин и др.; Нижегород. гос. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – 2-е изд. перераб. и доп. – Н. Новгород, 2014. – 269 с.
5. Пачурин Г.В., Щенников Н.И., Курагина Т.И., Филиппов А.А. Профилактика и практика расследования несчастных случаев на производстве: учебное пособие / под общ. ред. Г.В. Пачурина. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд. «Лань», 2015. – 384 с.
6. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. Утверждены Приказом МЧС РФ от 25 марта 2009 г. № 182. – URL: <http://monitor.gatchina.ru/sp/sp12.13130.2009.pdf>.
7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств», утверждены Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11.03.2013 № 96. – URL: <http://www.gosnadzor.ru/industrial/oil/acts/Серия%2009%20Выпуск%2037.pdf>.
8. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Щенников Н.И., Курагина Т.И. Производственный травматизм и направления его профилактики // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 1. – С. 45–50.
9. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А. Снижение опасных и вредных факторов при очистке поверхности сортового проката // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 2–1. – С. 38–43.
10. Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А. Оценка опасных и вредных факторов при производстве калиброванного проката и их устранение технологическими методами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 7–2. – С. 161–164.
11. Щенников Н.И., Пачурин Г.В. Пути снижения производственного травматизма // Современные наукоемкие технологии. – 2008. – № 4. – С. 101–103.
12. Щенников Н.И., Курагина Т.И., Пачурин Г.В. Психологический акцент в анализе производственного травматизма и его профилактики // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 4. – С. 162–169.