

др. тех. наук, проф. С.В. Поздеев / prof. S.V. Pozdieiev<sup>a)</sup>, D.Sc., канд. техн. наук В.В. Нижник / V.V. Nizhnyk, Ph.D.<sup>b)</sup>, ст. науч. сотр., канд. техн. наук Я.В. Балло / Y.V. Ballo, Ph.D.<sup>b)</sup>, канд. техн. наук А.М. Нуянзин / A.M. Nuianzin, Ph.D.<sup>a)</sup>, канд. техн. наук Р.В. Уханский / R.V. Uhanskyu, Ph.D.<sup>b)</sup>, канд. техн. наук В.С. Кропивницкий / V.S. Kropyvnytskyi, Ph.D.<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup>Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины / Cherkassy Fire Safety Institute named Heroes of Chernobyl, National University of Civil Defense of Ukraine

<sup>b)</sup>Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты / Research Institute of Civil Defense in Kiev

\*Corresponding author: 2801397@ukr.net

## Обоснование безопасного противопожарного расстояния между ферментаторами для производства биогаза

The Rationale for a Safe Distance Between Fermenters for Biogas Production

Uzasadnienie bezpiecznego odstępu przeciwpożarowego między fermentatorami do produkcji biogazu

### АНОТАЦИЯ

**Введение:** Во введении статьи приведено описание вопроса определения противопожарных расстояний для сооружений современного энергетического предприятия, функционирующего на альтернативных источниках энергии, а также одновременно производящего газ, электричество и тепло путем переработки отходов сельского хозяйства. Определены цель, объект и предмет исследований, а также приведены основные методы, используемые во время проведения научной работы. Приведен анализ процесса технологии производства биогаза, включающий определение наиболее опасного технологического сооружения комплекса по производству биогаза.

**Методы:** В первой части статьи приведены общее описание объекта, его конструктивных элементов и сценарии возникновения опасной ситуации, которые могут привести к пожару или взрыву на ферментаторе. Приведены результаты расчетов избыточного давления взрыва биогаза в ферментаторе, которые могут возникнуть в результате аварийной ситуации. Определена целостность элементов ферментатора под действием избыточного давления взрыва. Установлено, что расчетное избыточное давление взрыва не влияет на определение безопасных противопожарных расстояний между ферментаторами. В основной части статьи определен тип деформации для основных элементов конструкции наиболее опасного сооружения комплекса (полное разрушение или частичное повреждение) и обосновано последствия, к которым могут привести данные разрушения. Исследовано влияние размера отверстия через который вытекает и горит газ на диаметр факела и температуру пламени, создающего опасность для смежных сооружений. С помощью программных комплексов «FlowVision 2.5» и «MathCaD» разработаны и приведены схемы влияния механических сил на элементы конструкций ферментатора по производству биогаза, а также приведены графические модели развития горения ферментатора во время возможного пожара, включающего начальный этап горения и кульминационный момент пожара. По результатам расчетов по сценарию наиболее опасной аварии определено наибольшее возможное значение площади сечения факела и температуры пламени и приведен алгоритм расчета по определению безопасных расстояний между ферментаторами. Обосновано минимальное значение противопожарных расстояний между ферментаторами для безопасной эксплуатации комплекса по производству биогаза.

**Результаты и выводы:** В заключительной части приведены основные результаты исследований, в частности решена актуальная научно-практическая задача обеспечения взрывопожарной безопасности производства биогаза, а также обоснована методика расчетной оценки безопасного расстояния между ферментатором для производства биогаза. Приведены выводы по результатам научной работы и список использованных авторами литературных источников.

**Ключевые слова:** пожарная безопасность, ферментатор, биогаз, противопожарное расстояние, противопожарные разрывы, моделирование пожара

**Вид статьи:** оригинальная научная статья

Принята: 08.06.2018; Рецензирована: 16.10.2018; Одобрена: 05.11.2018;

Процентное соотношение вклада в создание статьи: С.В. Поздеев – 25%, В.В. Нижник – 20%, Я.В. Балло – 25%, А.М. Нуянзин – 10%, Р.В. Уханский – 10%, В.С. Кропивницкий – 10%;

Идентификаторы ORCID авторов: С.В. Поздеев – 0000-0002-9085-0513, В.В. Нижник – 0000-0003-3370-9027, Я.В. Балло – 0000-0002-9044-1293, А.М. Нуянзин – 0000-0003-2527-6073, Р.В. Уханский – 0000-0002-8312-5233, В.С. Кропивницкий – 0000-0002-3527-7283;

Просим ссылаться на статью следующим образом: ВіТР Vol. 51 Issue 3, 2018, pp. 60–67, doi: 10.12845/bitp.51.3.2018.4;

Настоящая статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

**ABSTRACT**

**Introduction:** The introduction to this paper deals with the question of defining fire-prevention distances for constructions in a modern energy enterprise operating on alternative energy sources, which can also simultaneously produce gas, electricity and heat from agricultural waste. The purpose, object and subject of the research are defined, and the basic methods used during the scientific work are presented. The analysis of the process of biogas production technology, which includes the indication of the most dangerous technological structure in the biogas production complex also involves an analysis of the existing means of fire protection, including the main technological equipment.

**Methods:** The first part of the article gives a general description of the object, its constructive elements and scenarios of the emergence of a hazardous situation, which can lead to a fire or explosion in the fermenters. The effect of the size of the hole through which the gas flows and burns on the diameter of the flame and its temperature, creating a hazard for adjacent structures, was investigated. The results of calculations of the excess pressure of the explosion of biogas in the fermenter, which can occur as a result of an emergency situation, are demonstrated. The integrity of the fermenter elements was determined in the conditions of an excess explosion pressure, and the effect of the excess explosion pressure on the calculation of safe distances was demonstrated. The main part of the article defines the type of deformation in the main structural elements of the most dangerous structure in the complex (complete or partial destruction or damage) and, to a reasonable extent, the consequences to which this destruction can lead. The effect of the size of the hole through which the gas flows and burns on the diameter of the flame and its temperature, which creates a hazard for adjacent structures, was investigated. Using the "FlowVision 2.5" software packages and "MathCaD" software suites, the schemes of impact of the main forces on the elements of the fermenter's biogas plants and the graphical models of the development of combustion in the fermenter during a possible fire, including the initial stage of burning and the fire climax, are presented. Based on the results of calculations for the scenario of the most dangerous accident, the maximum possible values of the height and radius of the flame, the cross-sectional area of the flame and the flame temperature are determined. The algorithm for calculating the safe distances between fermenters for the production of biogas is given. A justification for the minimum fire distances between the fermenters for the safe operation of the biogas production is given.

**Results and conclusions:** The final part contains the main results of the research, in particular, of the actual scientific and practical task of ensuring explosion safety in biogas production. Furthermore, the method of estimating the safe distances between the fermenters for biogas production is substantiated. Conclusions on the results of scientific work are presented and a list of literary sources used by the authors is indicated.

**Keywords:** fire safety, fermenter, biogas, fire distance, fire breaks, fire modeling

**Type of article:** original scientific article

Received: 08.06.2018; Reviewed: 16.10.2018; Accepted: 05.11.2018;

Percentage contribution: S.V. Pozdieiev – 25%, V.V. Nizhnyk – 20%, Y.V. Ballo – 25%, A.M. Nuianzin – 10%, R.V. Uhansky – 10%, V.S. Kropyvnytsky – 10%;

Authors' ORCID IDs: S.V. Pozdieiev – 0000-0002-9085-0513, V.V. Nizhnyk – 0000-0003-3370-9027, Y.V. Ballo – 0000-0002-9044-1293,

A.M. Nuianzin – 0000-0003-2527-6073, R.V. Uhansky – 0000-0002-8312-5233, V.S. Kropyvnytsky – 0000-0002-3527-7283;

Please cite as: BITP Vol. 51 Issue 3, 2018, pp. 60–67, doi: 10.12845/bitp.51.3.2018.4;

This is an open-access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

**ABSTRAKT**

**Wprowadzenie:** We wprowadzeniu do artykułu zawarto opis kwestii ustalenia przeciwpożarowych odstępów dla urządzeń współczesnego przedsiębiorstwa energetycznego, funkcjonującego na alternatywnych źródłach energii, a także jednocześnie produkującego gaz, elektryczność i ciepło drogą przetwarzania odpadów gospodarstwa rolnego. Określono cel, obiekt i przedmiot badań, a także przytoczono główne metody wykorzystane w czasie prowadzenia pracy naukowej. Przytoczono analizę procesu technologii produkcji biogazu, uwzględniającą ustalenie najbardziej niebezpiecznego technicznego urządzenia kompleksu do produkcji biogazu.

**Metody:** W pierwszej części artykułu przytoczono ogólny opis obiektu, jego elementów konstrukcyjnych oraz scenariusze zaistnienia niebezpiecznej sytuacji, które mogą doprowadzić do pożaru lub wybuchu w komorze fermentacyjnej. Przytoczono rezultaty wyliczeń nadmiernego ciśnienia wybuchu biogazu w fermentatorze, które mogą pojawić się w rezultacie sytuacji awaryjnej. Określono całość elementów fermentatora pod działaniem nadmiernego ciśnienia wybuchu. Ustalono, że obliczeniowe nadmierne ciśnienie wybuchu nie wpływa na określenie bezpiecznych odstępów przeciwpożarowych między fermentatorami. W głównej części artykułu określono typ deformacji dla głównych elementów konstrukcji najbardziej niebezpiecznego urządzenia kompleksu (całkowite zniszczenie lub częściowe uszkodzenie). Zbadano wpływ rozmiaru otworu, przez który wypływa i płonie gaz, na średnicę pochodni i temperaturę płomienia, stwarzającego niebezpieczeństwo dla urządzeń sąsiednich. Przy pomocy kompleksów programowych „FlowVision 2.5” i „MathCaD” opracowano i przytoczono schematy wpływu sił mechanicznych na elementy konstrukcji fermentatora do produkcji biogazu, a także przytoczono graficzne modele rozwoju palenia się fermentatora w czasie możliwego pożaru, włączającego początkowy etap palenia się i kulminacyjny moment pożaru. Na podstawie rezultatów wyliczeń według scenariusza najmniej niebezpiecznej awarii obliczono najbardziej prawdopodobną wartość pola przekroju pochodni i temperatury płomienia i przytoczono algorytm wyliczeń dla określenia bezpiecznych odległości między fermentatorami. Uzasadniono minimalną wartość odstępów przeciwpożarowych między fermentatorami dla bezpiecznej eksploatacji kompleksu do produkcji biogazu.

**Wyniki i wnioski:** W części końcowej przytoczono główne rezultaty badań, przede wszystkim rozwiązano aktualne naukowo-praktyczne zadanie zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego i wybuchowego dla produkcji biogazu, a także uzasadniono metodykę szacunkowej oceny bezpiecznego odstępu między fermentatorami do produkcji biogazu. Przytoczono wnioski z rezultatów pracy naukowej i listę wykorzystanych przez autorów źródeł literatury.

**Słowa kluczowe:** bezpieczeństwo pożarowe, fermentator, biogaz, odstęp przeciwpożarowy, oddzielenie przeciwpożarowe, modelowanie pożaru

**Typ artykułu:** oryginalny artykuł naukowy

Przyjęty: 08.06.2018; Zrecenzowany: 16.10.2018; Zatwierdzony: 05.11.2018;

Procentowy wkład merytoryczny: S.V. Pozdieiev – 25%, V.V. Nizhnyk – 20%, Y.V. Ballo – 25%, A.M. Nuianzin – 10%, R.V. Uhansky – 10%, V.S. Kropyvnytsky – 10%;

Identyfikatory ORCID autorów: S.V. Pozdieiev – 0000-0002-9085-0513, V.V. Nizhnyk – 0000-0003-3370-9027, Y.V. Ballo – 0000-0002-9044-1293,

A.M. Nuianzin – 0000-0003-2527-6073, R.V. Uhansky – 0000-0002-8312-5233, V.S. Kropyvnytsky – 0000-0002-3527-7283;

Proszę cytować: BITP Vol. 51 Issue 3, 2018, pp. 60–67, doi: 10.12845/bitp.51.3.2018.4;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

## Введение

На сегодняшний день в Украине действует достаточно исчерпывающая нормативная база в области строительства и организации противопожарных мероприятий, включающая вопросы соблюдения пожарной безопасности при проектировании, реконструкции и эксплуатации энергетических предприятий. Противопожарные расстояния следует устанавливать в зависимости от назначения, категории по взрывопожарной и пожарной опасности, степени огнестойкости сооружений в соответствии с требованиями нормативных документов, действующих на территории Украины [1].

Реформирование энергетической отрасли, совершенствование существующих технологий и создание новых способов производства энергии способствующих развитию нетипичных энергетических предприятий с новым нестандартным оборудованием и технологическими процессами, риск возникновения и масштаб опасных ситуаций которых сегодня не исследован, поэтому противопожарные требования для них фактически отсутствуют. В таком случае определение величины противопожарных расстояний могут осуществляться с использованием расчетных методов [2].

Примером современного, нетипичного энергетического предприятия является комплекс по производству биогаза (далее – Комплекс), построенный в пгт Ракитное Киевской области. Особенность заключается в том, что объект одновременно может производить газ, электричество и тепло, путем генерации газа из отходов сельского хозяйства. В связи с отсутствием нормативных требований, в частности относительно противопожарных расстояний для таких производств, актуальной задачей является обоснование безопасного расстояния между ферментатором по производству биогаза на основе вычислительного эксперимента по моделированию опасных факторов взрыва и пожара при нарушении нормального режима работы ферментатора.

## Цель исследований

Целью исследований является обоснование безопасного расстояния между ферментаторами путем моделирования пожара и его развития в ферментаторе для производства биогаза. Объект исследования – процессы теплообмена при взрыве и возможного пожара в ферментаторе, что применяется в технологии производства биогаза. Предметом исследований является влияние теплового потока пожара и избыточного давления взрыва на безопасные расстояния между ферментаторами по производству биогаза.

## Методы исследования

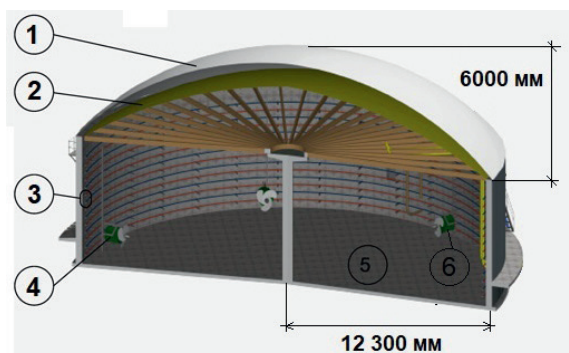
В работе использованы расчетный метод определения избыточного давления взрыва газозвушной смеси, расчетный метод определения прочности резервуара в случае взрыва внутри его объема, метод компьютерного моделирования с помощью программного комплекса FlowVision 2.5 на основе систем дифференциальных уравнений непрерывных сред типа уравнений Навье-Стокса, решение уравнений Стефана-Больцмана в условиях нагрева при пожаре и уравнений теплопроводности Фурье, математические методы обработки результатов исследований с использованием программного обеспечения MathCad и Microsoft Office Excel.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи исследований:

- рассмотреть и выполнить техническое описание объекта и технологии производства биогаза с помощью ферментаторов и определить расчетные сценарии возможной аварии с возникновением и развитием возможного пожара и взрыва во внутреннем пространстве ферментатора;
- с использованием разработанных сценариев аварийной ситуации выполнить расчетную оценку избыточного давления взрыва газозвушной смеси в газгольдере ферментатора и оценку геометрии зоны возможного разброса обломков ферментатора;
- изучить геометрию и энергетические параметры факела пожара над ферментатором с использованием методов вычислительной газогидродинамики и получения обоснованной величины безопасного расстояния между ферментаторами на основе полученных результатов.

## Описание объекта

Технологическим процессом предусмотрена ферментация (сбраживание) сырого биологического сырья (силоса, отходов от сахарной свеклы, кукурузы и т.д.) в метантенках с постепенным выделением биологического газа, временно накапливаемого в газгольдерах, а затем подаваемого на хозяйственные нужды или для сжигания в генераторной для производства тепла и электроэнергии. Основным сооружением Комплекса производства биогаза является ферментатор с максимальным объемом газа 217 м<sup>3</sup>, состоящий из двух основных ограждающих частей, а именно упругой оболочки из полиэфирной ткани баллистического плетения с двухсторонним полиуретановым покрытием, затянутой кольцом (крыля ферментатора), и железобетонного резервуара (корпус ферментатора) (рис. 1).



**Рисунок 1.** Внешний вид и сечение ферментатора (1 – купол; 2 – мембрана; 3 – система обогрева; 4 – механические мешалки; 5 – ферментатор)

**Figure 1.** The external view of a fermenter (1 - dome; 2 - membrane; 3 - heating system; 4 - mechanical agitators; 5 - fermenter)

**Источник:** Собственная разработка.

**Source:** Own elaboration.

Высота оболочки ферментатора –  $H_1 = 6000$  мм; толщина оболочки –  $h = 0,9$  мм; радиус опорного кольца –  $r_1 = 12300$  мм. Расчет ограждающей конструкции ферментатора выполнялся для пояса высотой 1 м на высоте 1,5 м от дна, так как на него действует максимальное суммарное усилие избыточного давления газа и гидростатического давления жидкости. Нижний пояс не принимался во внимание, учитывая, что он снаружи находится в почве. Расчеты выполнялись с учетом конструктивных особенностей резервуара из сборного железобетона, общая высота которого составляла 8500 мм, а диаметр – 24600 мм (рис. 1).

Стенка цилиндра жестко связана с плитой днища, средняя толщина стенки составляет 300 мм с учетом защитного слоя. Средняя плотность армированного железобетона –  $2500 \text{ кг/м}^3$ , используется арматура А500С, имеющая норматив сопротивления растяжению до 500 МПа. Резервуар заполнен жидкостью (мокрый ил) с удельным весом  $16,5 \text{ кН/м}^3$ , на высоту 8000 мм. Коэффициент надежности по нагрузке – 1,2.

Описание аварии, которая может возникнуть во время эксплуатации ферментатора в результате нарушения технологического процесса или механического повреждения:

- разгерметизация мембраны газгольдера и образования в его объеме газовой смеси, которая при наличии источника зажигания (короткое замыкание в смесителе осадка) вызывает взрыв;
- механическое повреждение верхней защитной оболочки ферментатора и мембраны, вследствие чего происходит утечка газа из резервуара, который при наличии источника зажигания может воспламениться и поддерживать горение.

Учитывая, что территория парка газгольдеров защищена молниезащитой, сценарий попадания молнии в газгольдер не рассматривается. Дополнительные средства противопожарной защиты газгольдера отсутствуют. Во время взрыва в одном из ферментаторов возникает возможность повреждения его конструкций и их разброса в пространстве, что может привести к повреждению верхней защитной оболочки соседнего ферментатора с последующим

развитием аварии. Поэтому условием безопасного расстояния между ферментатором по сценарию взрыва избрано максимально возможное расстояние разлета обломков ферментатора.

Избыточное давление взрыва определялось согласно [3]. Из общего объема биогаза в ферментаторе максимальный объем метана ( $\text{CH}_4$ ) составляет около 75%, то есть  $162,75 \text{ м}^3$ , диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ) 15%, сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ ) 2%, Водород (H) 0-1% и другие газы. Масса метана, которая нужна для зажигания объема при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  и давлении 101,8 кПа, составляет 101,91 кг. Взрывоопасная концентрация метана – 9,5%. При концентрации более 16% метан горит без взрыва. Объем воздуха необходимый для полного сгорания биогаза такой массы составляет  $1519,85 \text{ м}^3$ .

При объеме биогаза  $217 \text{ м}^3$  количество воздуха в газгольдере составляет  $483 \text{ м}^3$ , то есть воздуха недостаточно для полного сгорания газа. При таких условиях масса газа, которая будет принимать участие в горении, будет составлять 31 кг.

Стехиометрическая концентрация для  $\text{CH}_4$  ( $C_{\text{ст}}$ ) составляет 9,36%. Объем газа соответствующий этой концентрации, составляет  $65,52 \text{ м}^3$ . Масса метана, которая необходима для сжигания такого объема, составляет 41,03 кг.

Подставив исходные данные в формулу (1) определено, что избыточное давление взрыва в случае разгерметизации оболочки ферментатора составляет 101,35 кПа.

$$\Delta P = (P_{\text{max}} - P_0) \cdot \frac{m \cdot z}{V_{\text{свобод}} \cdot \rho_{\text{г.п.}}} \cdot \frac{100}{C_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{K_n} \quad (1)$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимальное давление взрыва стехиометрической газо- или паровоздушной смеси в замкнутом объеме, которое определяют опытным путем или принимают по справочным данным. В случае отсутствия таких данных разрешено принимать  $P_{\text{max}}$  равным 900 кПа;

$P_0$  – атмосферное давление, кПа (разрешено принимать равным 101,3 кПа);

$m$  – масса горючих газов (ГГ), попавших в результате расчетной аварии в объем помещения, определяемые для ГГ по формуле [3], кг;

## RESEARCH AND DEVELOPMENT

$Z$  – коэффициент участия ГГ, который может быть рассчитан на основании характера распределения газов и паров в объеме помещения согласно приложению. Разрешено принимать значение  $Z$  [таблица 2];

$V_{\text{свобод}}$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{г.п.}}$  – плотность ГГ при расчетной температуре  $t_{\text{р}}$ , кг · м<sup>-3</sup>,

$C_{\text{ст}}$  – стехиометрическая концентрация, г/м<sup>3</sup>.

На устойчивость к рассчитанному избыточному давлению взрыва проведена оценка двух элементов ферментатора: внешняя упругая оболочка ферментатора и его ограждающая железобетонная конструкция для резервуара.

Условием разрушения элементов ферментатора являются:

$$\sigma_x \geq \sigma_{\text{доп}} \quad (2)$$

где  $\sigma_x$  – избыточное давление взрыва (при оценке внешней оболочки ферментатора) или избыточное давление взрыва и гидростатическое давление жидкости (при оценке

целостности ограждающей железобетонной конструкции ферментатора), Па;

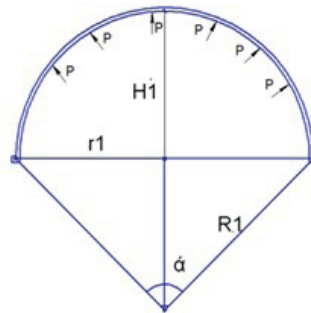
$\sigma_{\text{доп}}$  – давление при котором разрушаются внешняя оболочка газгольдера и ограждающая конструкция метантенка, Па.

При оценке действия сил на внешнюю оболочку ферментатора одоп определяется по формуле:

$$\sigma_x = \frac{-P \cdot R_1 \cdot r_1}{2} \cdot \frac{\cos(\alpha) - \mu \frac{\sqrt{R_1 \cdot h_1}}{r_1}}{F_1 + \mu \cdot h_1 \cdot \sqrt{R_1 \cdot h_1}} \quad (3)$$

где  $P$  – избыточное давление газов, в рабочем режиме, 0,5 кПа;  $R_1$  – радиус от зеркала поверхности биологической сброженной массы до стенки оболочки ферментатора, м;  $r_1$  – радиус опорного кольца резервуара сбраживания осадка, м;  $F_1$  – сила сопротивления опорного кольца упругой оболочки, кПа,  $\mu$  – коэффициент Пуассона ( $= 0,45$ );  $h_1$  – толщина оболочки ( $= 0,9$  мм).

На рис. 2 приведена расчетная схема действия сил на внешнюю оболочку ферментатора.



**Рисунок 2.** Расчетная схема действия сил на внешнюю оболочку ферментатора

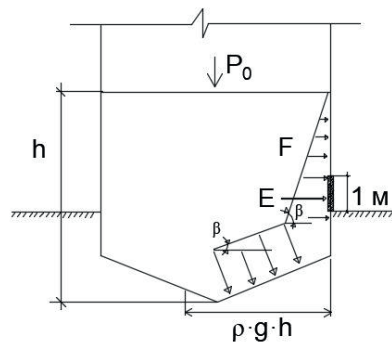
**Figure 2.** The design model of the action of forces on the outer shell of the fermenter

**Источник:** Собственная разработка.

**Source:** Own elaboration.

Подставив значения исходных данных [1] в формулу (3) по результатам расчетов, предельное нарушение целостности материала оболочки ферментатора составляет 93,3 кПа. Поскольку избыточное давление взрыва при оценке ограждающей конструкции резервуара сбраживания

осадка ферментатора,  $\sigma_{\text{доп}}$  принимаем равным нормативному сопротивлению для осевого растяжения железобетона (марка бетона В55 и арматуры марки А500С), что составляет 2,45 МПа [4]. На рис. 3 приведена схема действия гидростатических сил на резервуар ферментатора.



**Рисунок 3.** Расчетная схема действия гидростатических сил на резервуар ферментатора

**Figure 3.** The design model of the action of hydrostatic forces on the fermenter's tank

**Источник:** Собственная разработка.

**Source:** Own elaboration.

Гидростатическое давление определяем по формуле (4) и оно составляет 5,9 кПа.

$$P_x = \gamma_g \cdot (H_k - x_k) \cdot \gamma_f \quad (4)$$

где  $\gamma_g$  – удельный вес жидкости в резервуаре,  $\frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$ ;  
 $H_k$  – высота цилиндрической стены, мм;  
 $x_k$  – высота жидкости, мм;  
 $\gamma_f$  – коэффициент надежности (принято 1,2).

Результаты расчетов показали, что внешняя упругая оболочка ферментатора при воздействии на нее нормативного давления взрыва разрушается, при этом поскольку сумма избыточного давления взрыва и гидростатическое давление жидкости на стенки ферментатора не превышает значения сопротивления для растяжения железобетонной конструкции [4], то таким образом избыточное давление взрыва не влияет на определение безопасных расстояний между ферментаторами.

При возникновении горения в одном из ферментаторов на соседний действует тепловой поток, при достижении критических значений которого возможна разгерметизация внешней оболочки ферментатора с последующим распространением пожара. Так же, во время моделирования учитывалось среднее значение бокового ветра величиной 5 м/с. Для определения плотности теплового потока, излучаемого горящим ферментатором, исследовалось влияние диаметра отверстия, через который вытекает и горит газ, на температуру пламени и площадь сечения факела пламени. Поэтому, условием определения безопасного расстояния между ферментаторами принимаем неравенство:

$$q_{\text{опр}} \leq q_{\text{доп}} \quad (5)$$

где:  $q_{\text{опр}}$  – плотность теплового потока, создаваемого факелом пламени пожара;  $q_{\text{доп}}$  – допустимый тепловой поток.

Расчетная модель ферментатора приведена на рисунке 4.

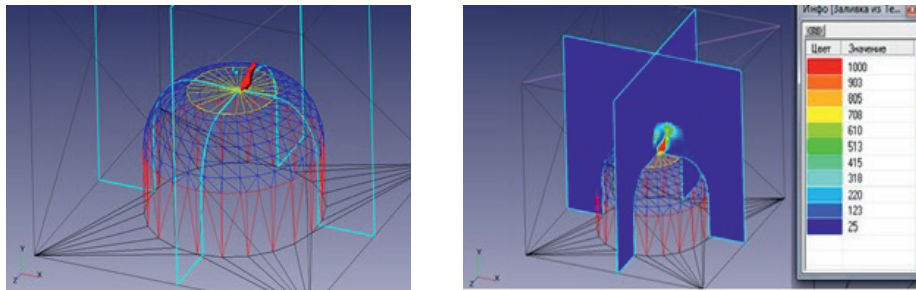


Рисунок 4. Расчетная модель ферментатора в момент возгорания

Figure 4. The design model of the fermentator at the ignition time

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

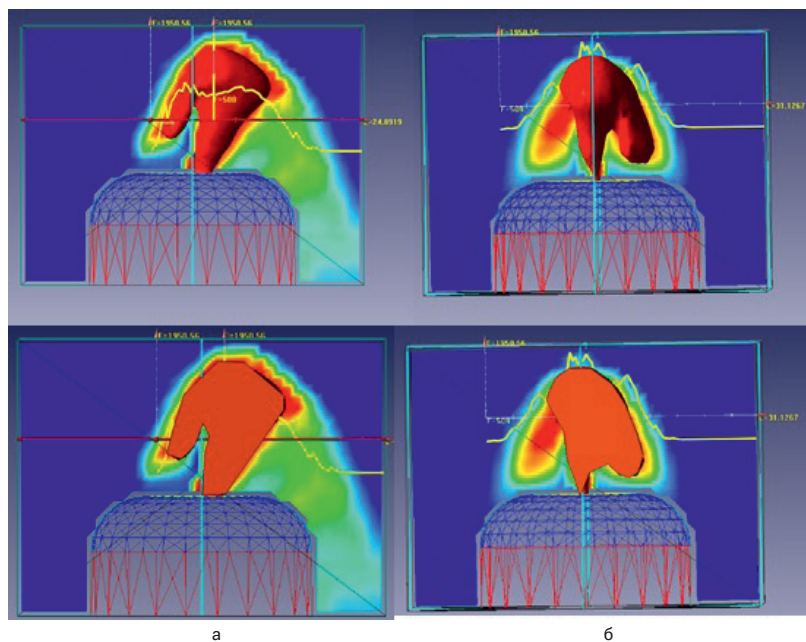


Рисунок 5. Графическая модель развития горения: а – начальный этап развития пожара, б – кульминационный момент пожара

Figure 5. The graphic model of combustion development: a – the initial stage of fire, b – the climax of the fire

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

По результатам расчетов определено, что наибольшее значение высоты и радиуса факела пламени составляет 15,4 м и 14,7 м соответственно, площади сечения факела пламени и температуры пламени достигает при диаметре 1000 мм для отверстия через которое вытекает газ. В то же время наибольшая температура пламени достигает около 1130°C, а площадь сечения факела пламени составляет 188,4 м<sup>2</sup>. Визуализация результатов расчета приведена на рис. 5.

Расчет плотности теплового потока, излучаемого горящим ферментатором, производится по формуле закона Стефана-Больцмана [5–6] в кульминационный момент пожара:

$$q_{опр} = \varepsilon_{\phi, \omega} C_0 \left[ \left( \frac{T_{\phi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\omega}}{100} \right)^4 \right] \psi_{\phi, \omega} \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{\phi, \omega}$  – приведена степень черноты;  $C_0$  – константа излучения абсолютно черного тела;  $T_{\phi}$  – температура факела,  $T_{\omega}$  – температура поверхности, которая облучается,  $\psi_{\phi, \omega}$  – коэффициент облучения поверхности тела.

По результатам расчетов определено, что наибольшее значение плотности теплового потока, излучаемого горящим ферментатором составляет 93916,71 кВт/м<sup>2</sup>.

Значение допустимого теплового потока  $q_{доп}$  для облучаемого ферментатора получим с уравнения времени достижения критической температуры материала на действующие высокие температуры и определяем по формуле:

$$q_{доп} = c \cdot r \cdot L \cdot (T_2 - T_1) / (t \cdot h) \quad (7)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(м<sup>3</sup> · К);  $\rho$  – плотность материала кг/м<sup>3</sup>;  $L$  – толщина слоя материала, м;  $T_1$  – начальная температура, С<sup>0</sup>;  $T_2$  – критическая температура, С<sup>0</sup>;  $t_2$  – время, в течение которого достигается критическая температура, с;  $\eta$  – коэффициент поглощения.

По результатам расчетов определено, что значение допустимого теплового потока  $q_{доп}$  составляет 34,875 кВт/м<sup>2</sup>.

Алгоритм расчета безопасного расстояния между ферментаторами по сценарию возникновения пожара в [7], приведены на рис. 6.

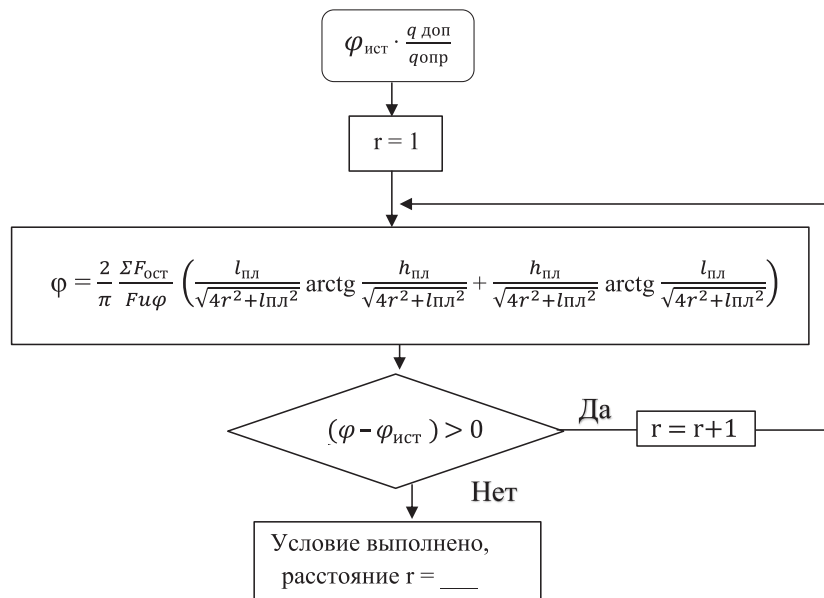


Рисунок 6. Алгоритм проведения расчетов

Figure 6. Calculation algorithm

Источник: Собственная разработка.

Source: Own elaboration.

Используя уравнение (6), определяем безопасное расстояние между ферментаторами по сценариям возникновения пожара, где  $l_{пл}$  – длина (радиус) пламя,  $h_{пл}$  – высота пламени, м,  $r$  – расстояние между ферментатором, м  $\psi_{\phi, \omega}$  – коэффициент облучения.

Расчет проводят путем пересчета по последовательным значениям до момента достижения момента выполнения условия:

$$\varphi - \varphi_{ист} \leq 0 \quad (8)$$

где:

$\varphi$  – коэффициент облучения;  
 $\varphi_{ист}$  – истинный коэффициент облучения;

$$\psi_{\phi, \omega} = \frac{q_{доп}}{q_{опр}} \quad (9)$$

где:

$q_{доп}$  – значение допустимого теплового потока;  
 $q_{опр}$  – определенное значение теплового потока.

По результатам расчетов установлено, что безопасное расстояние, по сценарию возникновения пожара между ферментаторами, должно быть не менее 20 м.

## Заключение

В данной работе решена актуальная научно-практическая задача по повышению взрывопожарной безопасности производства биогаза путем обоснования методики расчетной оценки безопасного расстояния между ферментаторами для производства биогаза. При этом были получены такие основные результаты:

1. Обоснована модель возникновения взрыва и развития пожара в ферментаторе с использованием методов вычислительной газогидродинамики;
2. Определено избыточное давление вероятного взрыва в газгольдере ферментатора, значение которого может достигать значений более 100 кПа;
3. С использованием полученных результатов по избыточному давлению взрыва была проведена оценка разрушений конструкции ферментатора. При этом было обнаружено, что при взрыве разрушается только внешняя упругая оболочка ферментатора без образования осколков, которые могли бы повредить внешнюю оболочку соседнего ферментатора при их разлете. Вместе с тем, при воздействии гидростатического давления жидкости и указанного избыточного давления жидкости и указанного давления взрыва ограждающая конструкция резервуара ферментатора не разрушается. Таким образом, избыточное давление взрыва в газгольдере ферментатора на значение безопасного расстояния между ферментаторами не влияет;

4. По результатам математического моделирования теплообмена при пожаре над ферментатором, было обосновано безопасное значение расстояния между ферментаторами для производства биогаза, характеристики которых соответствуют [8], которое должно составлять не менее 20 м.

## Литература

- [1] DBN V.1.1-7:2016 Pozhezhna bezpeka ob'yektiv budivnytstva. Zahal'ni vymohy, Derzhavne pidpryyemstvo Ukrarkhbudinform, Kyev 2017, 4.
- [2] Postanova KMU (zi zminamy) Pro zatverdzhennya Tekhnichnoho rehlamentu budivel'nykh vyrobiv, budivel' i sporud, 20.12.2006, No. 1764.
- [3] DSTU B V.1.1-36:2016 Vyznachennya katehoriy prymishchen', budynkiv ta zovnishnikh ustanovok za vybukhopozhezhnoyu ta pozhezhnoyu nebezpekoayu, Nakaz Minrehion Ukrayiny, 2016, No. 158, 34.
- [4] SP 52-101-2003 Betonnye y zhelezobetonnye konstruktssyy bez predvartel'noho napryazhenyya armatury, Prykaz Hosstroya Rossyy ot 25.12.2003, No. 215, 59.
- [5] Myshlanova M.Yu. *Yntehral'nyy effekt vnedrenyya al'ternatyvnoho enerhonosytelya – byohaza*, w: *Sbornyk nauchnykh trudov Vserosyyskoho nauchno-tekhnycheskoy konferentsyy*, 2004.
- [6] Serensen S.V. *Spravochnyk mashynostroytelya*, t. 3, Moskva 1963.
- [7] Baratov A.N., Korol'chenko A.Ya., Kravchuk N.N. et. al., *Pozharovzryvoopasnost' veshchestv y materyalov y sredstva ykh tushenyaya*, Spravochnoe yzdanye: v 2-kh knyakh., Khymyya, Moskva 1990, 496.
- [8] Proektnaya dokumentatsyya kompleksa po proyzvodstvu byolohycheskoho haza (metana) yz otkhodov sel'skoho khozyaystva ZORG, Kyev 2012, 47.

**С.В. ПОЗДЕЕВ, Д-Р. ТЕХ. НАУК, ПРОФ** – Главный научный сотрудник Черкасского института пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины. 2002 год – кандидат технических наук, 2012 год – доктор технических наук по специальности пожарная безопасность.

**В.В. НИЖНИК, КАНД. ТЕХН. НАУК, СТ. НАУЧ. СОТР.** – начальник Центра технического регулирования Научно-исследовательского института гражданской защиты (г. Киев). Ведущий специалист в Украине по нормативно-правовому обеспечению объектов строительства в области пожарной безопасности.

**Я.В. БАЛЛО КАНД. ТЕХН. НАУК** – старший научный сотрудник Отдела Нормативно-Правового Обеспечения Научно-исследовательского института гражданской защиты (г. Киев). Специалист в области противопожарного водоснабжения, а также нормативно-правового обеспечения объектов строительства в области пожарной безопасности.

**А.М. НУЯНЗИН, КАНД. ТЕХН. НАУК** – старший научный сотрудник Черкасского института пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины. Занимается научными исследованиями процессов развития и прекращения горения.

**Р.В. УХАНСКИЙ, КАНД. ТЕХН. НАУК** – начальник Нормативно-Правового Отдела Научно-Исследовательского Института Гражданской Защиты (г. Киев). Ведущий специалист в Украине по нормативно-правовому обеспечению объектов строительства в области пожарной безопасности.

**В.С. КРОПИВНИЦКИЙ, КАНД. ТЕХН. НАУК.** – начальник Научно-Исследовательского Института Гражданской Защиты (г. Киев). Ведущий специалист в Украине в области гражданской защиты населения, а также обеспечения пожарной безопасности объектов строительства разного функционального назначения.