

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ

Шинкоренко К.Е., Грачулин А.В., Рябцев В.Н.

*Цель.* Провести анализ методик определения режимов течения газожидкостных смесей в цилиндрическом канале. На основе проведенного анализа разработать методику проведения экспериментальных исследований движения компрессионной пены в автоматических установках пожаротушения.

*Методы.* В процессе выполнения работы применялись основные теоретические и эмпирические методы исследования, а также общие научные методы исследования (анализ, систематизация).

*Результаты.* Разработаны конструкция экспериментальной установки и методика проведения экспериментальных исследований движения компрессионной пены в автоматических установках пожаротушения.

*Область применения исследований.* Разработка методики гидравлического расчета автоматических установок пожаротушения, генерирующих компрессионную пену.

*Ключевые слова:* автоматическая установка пожаротушения, гидравлический расчет, трубопровод, газожидкостная смесь, двухфазное течение, давление, расход.

(Поступила в редакцию 8 февраля 2023 г.)

### Введение

В современном мире автоматические установки пожаротушения являются одним из наиболее эффективных элементов системы противопожарной защиты благодаря возможности автоматической подачи огнетушащего вещества в очаг возникшего пожара, что позволяет его локализовать либо ликвидировать на начальной стадии без участия человека с минимальным ущербом [1].

Перспективной технологией тушения пожаров автоматическими установками пожаротушения являются установки генерирования компрессионной пены, формирующейся вследствие принудительного введения воздуха (инертного газа) под давлением в поток раствора пенообразователя (рис. 1). Рассматриваемые установки позволяют уменьшить расход воды и пенообразователя, а также время тушения пожара [2].

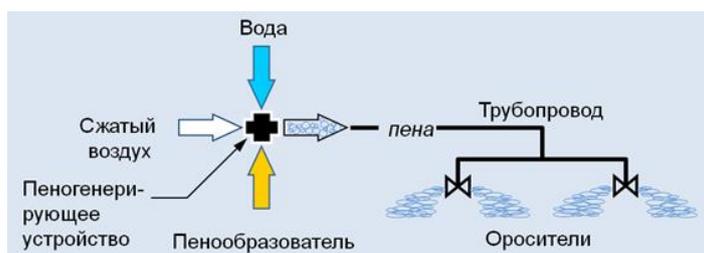


Рисунок 1. – Общая схема автоматической установки пожаротушения компрессионной пеной<sup>1</sup>

Данная технология пожаротушения получила широкое распространение в зарубежных странах<sup>2</sup>, однако на территории СНГ она внедряется не так стремительно [2]. Одной из причин этого является отсутствие нормативной методики гидравлического расчета автоматических установок пожаротушения, генерирующих компрессионную пену.

<sup>1</sup> Каталог группы компаний «СТАЛТ» (Российская Федерация) [Электронный ресурс] / СТАЛТ комплексные системы безопасности жизнеобеспечения объектов. – Режим доступа: <http://www.stalt.ru/index.php?Itemid=346>. – Дата доступа: 24.01.2023.

<sup>2</sup> CAFS – Straight answers for the beginner or the experienced user [Electronic resource] / Compressed Air Foam Systems. – Mode of access: [http://compressedairfoamsystem.com/compressed\\_air\\_foam\\_systems.htm](http://compressedairfoamsystem.com/compressed_air_foam_systems.htm). – Date of access: 24.01.2023.

Компрессионная пена представляет собой газожидкостную смесь (вода, пенообразователь и воздух), а существующие методики гидравлического расчета при проектировании автоматических установок пожаротушения не учитывают режимы движения двухфазных течений, от которых зависят гидравлические потери в трубопроводе. Проектирование данных установок должно осуществляться в соответствии с руководством по проектированию производителя<sup>3</sup>. При этом предлагаемые производителями методики расчета значительно упрощены: рассматривается только тупиковый питающий трубопровод с симметричным расположением пар оросителей<sup>4</sup> (рис. 2) относительно пеногенерирующего устройства (ПГУ), а также не учитывается структура и физические особенности движения газожидкостного потока.

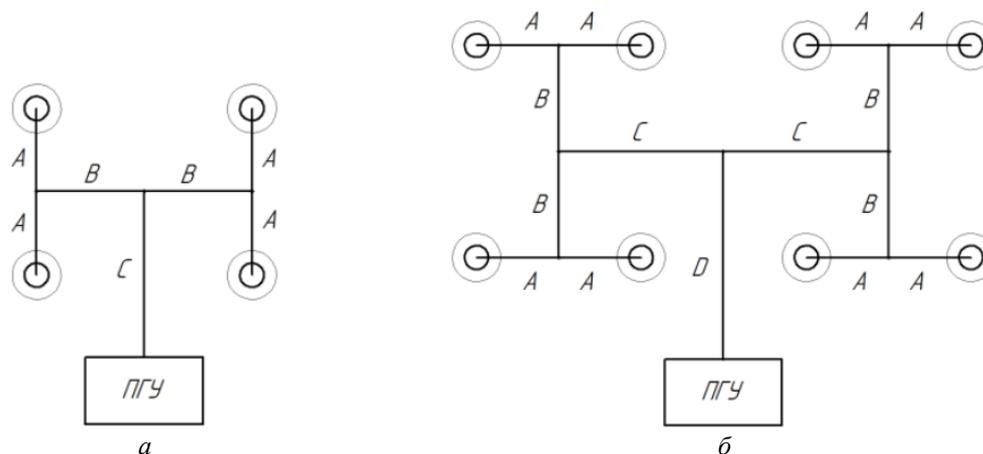


Рисунок 2. – Пример конфигурации установки на 4 (а) и 8 (б) оросителей

Авторами статьи предлагается конструкция экспериментальной установки и методика проведения экспериментальных исследований движения компрессионной пены в автоматических установках пожаротушения. Это позволит определить влияние различных факторов на режимы течения компрессионной пены, а также установить, при каких параметрах создаются оптимальные условия для работы автоматической установки пожаротушения, генерирующей компрессионную пену.

### Основная часть

**Связь режимов течения и гидравлических расчетов.** В сфере обеспечения пожарной безопасности режимы течения рассматриваются при проведении гидравлических расчетов автоматических установок пожаротушения водой, пеной низкой и средней кратности, а также рукавных линий при движении по ним воды или раствора пенообразователя. Гидравлический расчет является важнейшим этапом проектирования автоматических установок пожаротушения.

Целью гидравлического расчета является определение расчетного расхода воды из условия одновременной работы всех оросителей на расчетной площади, а также определение диаметров трубопроводов и необходимого давления у водопитателей. Методика гидравлического расчета установок пожаротушения изложена в строительных нормах СН 2.02.03<sup>5</sup>.

<sup>3</sup> Standard for Low-, Medium-, and High-Expansion Foam. National fire protection association 11 [Electronic resource] / NFPA. – Mode of access: <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=11>. – Date of access: 26.01.2023.

<sup>4</sup> Установка пожаротушения с генерированием пены компрессионным способом. Руководство по проектированию / ООО «СТАЛТ». – СПб., 2020. – 79 с.

<sup>5</sup> Пожарная автоматика зданий и сооружений. Строительные нормы Республики Беларусь: СН 2.02.03-2019 (с изм. № 1) – Введ. 18.08.21 (с отменой ТКП 45-2.02-317-2018, СНБ 2.02.02-01 (п. 5.10, табл. 13), СН 3.02.03-2019 (подразд. 5.4), НПБ 15-2007). – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 99 с.

В инженерных расчетах для описания движения жидкостей в каналах постоянного сечения (трубопроводах) поток жидкости рассматривается стационарным: в элементарном объеме между поперечными сечениями канала параметры потока в трубопроводе (плотность, температура, давление и скорость) не изменяются во времени. В стационарном потоке параметры потока могут изменяться только от сечения к сечению канала. Движение воды по трубопроводу характеризуется постоянством объемного расхода из-за несжимаемости воды. Это позволяет принимать значение скорости потока воды в расчетах постоянным по всей длине трубопровода и, как следствие, с постоянным значением числа Рейнольдса [2].

Сложности в гидравлическом расчете возникают, когда в качестве огнетушащего вещества применяется компрессионная пена. В составе компрессионной пены присутствует воздух, который при избыточном давлении сжимается, что приводит к изменению его физических свойств (плотности и вязкости) и, как следствие, к изменению свойств потока в целом. Движение компрессионной пены по длине трубопровода сопровождается падением давления, приводящим к расширению воздуха в потоке и его ускорению. Вследствие этого падение давления по длине трубопровода при движении компрессионной пены не будет линейным, как при движении воды, из-за изменения плотности и скорости движения потока. В связи с этим традиционная методика гидравлического расчета не может использоваться для определения потерь давления в трубопроводах при движении по ним компрессионной пены [2].

Совместное движение газа и жидкости по трубопроводу характеризуется наличием различных форм течения, определяемых в основном распределением фаз по сечению трубы, что, в свою очередь, зависит от объемного содержания газа в потоке смеси, скорости течения, физических свойств фаз и других факторов [3].

**Описание режимов течения газожидкостных смесей.** Движение газожидкостных смесей исследуется на протяжении долгого времени. Основной причиной этого является широкая распространенность газожидкостных потоков в различных отраслях промышленности, особенно в нефтегазодобывающей.

Режимы течения газожидкостных потоков в трубопроводах различаются по характеру движения каждой из фаз и их структуре. Глобальная картина движения определяется смачиваемостью внутренней поверхности трубопровода жидкостью [4]. При течении жидкости, смачивающей материал трубопровода, на внутренней поверхности последнего всегда формируется жидкая пленка, а газ отжимается в ядро потока смеси. При течении жидкости, не смачивающей материал трубопровода, значительная масса жидкости оттесняется в ядро потока, а газ прорывается между внутренней поверхностью трубопровода и струями жидкости. Режимы течения газожидкостных потоков в вертикальных трубопроводах представлены в [4] с упоминанием работ А.Н. Ложкина, П.И. Кроля, В.В. Померанцева и С.Н. Сыркина. Режимы течения газожидкостных потоков в горизонтальных трубопроводах приведены со ссылками на опыты А.А. Арманда, В.Е. Накорякова, Б.Г. Покусаева, В.А. Утовича и др. Особенностью течения газожидкостной смеси в трубопроводах, наклонных по отношению к вектору силы тяжести, является асимметрия потока жидкой фазы, обусловленная ее стеканием к нижней образующей трубопровода.

Основные структуры газожидкостного потока в горизонтальных и наклонных трубах приведены на рисунке 3 [5].

Типичные структуры вертикальных (пузырьковая, снарядная, вспененная, капельно-пленочная и клочкообразно-пленочная) и горизонтальных (пузырьковая, расслоенная, снарядная, гребневая, капельно-пленочная) потоков представлены в работе [6]. При этом подробно описаны вертикальные восходящие потоки. На диаграмме (рис. 4) показаны примерные области существования режимов движения восходящего газожидкостного потока по данным Хьюита и Робертса [7]. Диаграмма представлена в координатах потоков

импульса соответствующих фаз  $\rho_1(v_1\varepsilon_1)^2$  и  $\rho_2(v_2\varepsilon_2)^2$ , где  $v\varepsilon$  – приведенная к сечению трубопровода скорость фазы (индекс «1» относится к жидкости). Для вертикальных нисходящих течений режимы сходны с восходящими, за исключением того, что вспененного режима течений не существует [6].

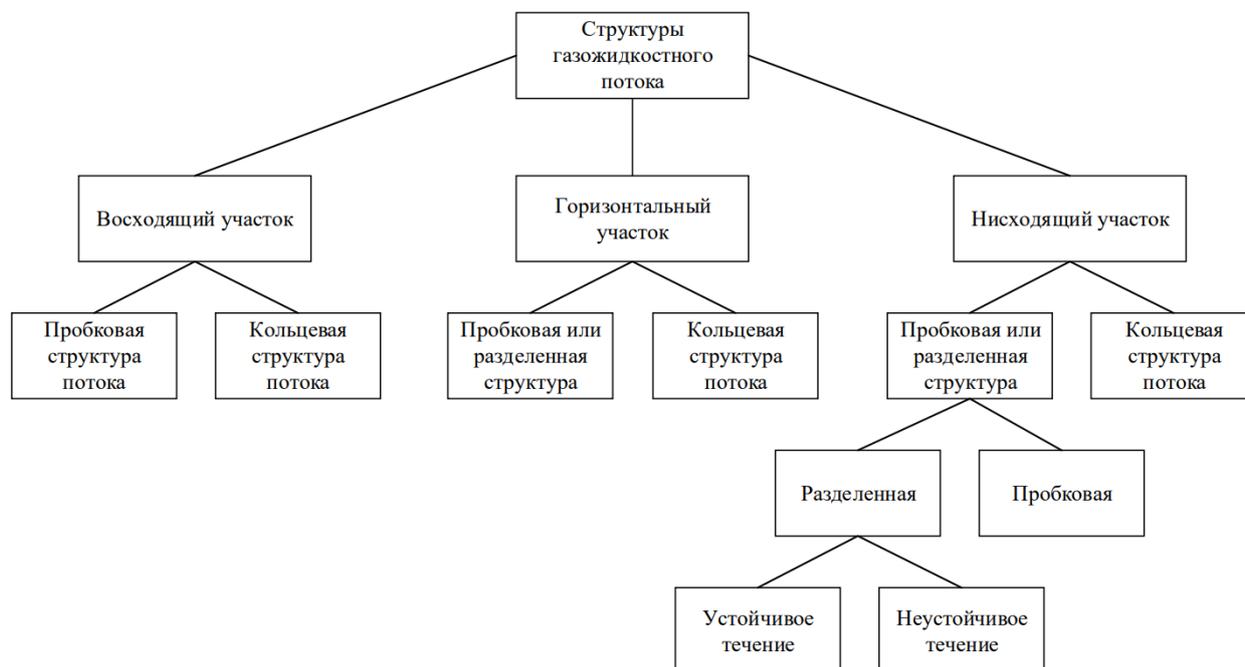
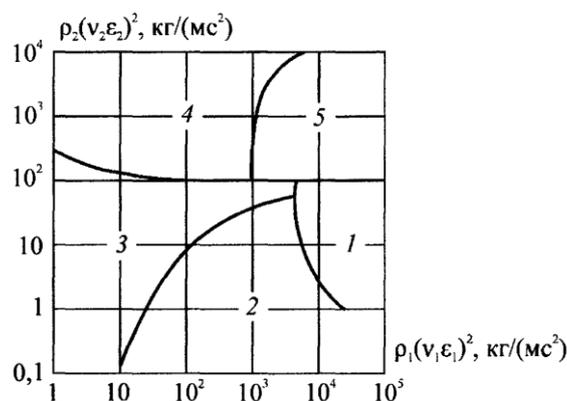


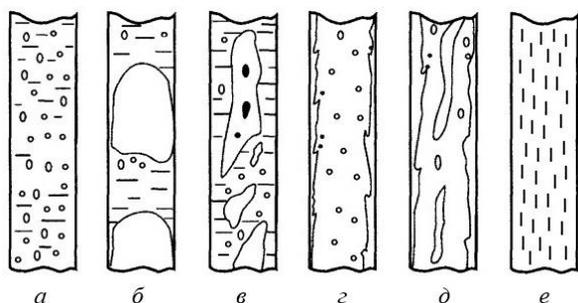
Рисунок 3. – Структурные формы двухфазного газожидкостного потока в трубопроводе [5]



1 – пузырьковый; 2 – снарядный; 3 – вспененный; 4 – капельно-пленочный; 5 – ключкообразно-пленочный  
Рисунок 4. – Диаграмма режимов для газожидкостного восходящего течения [6]

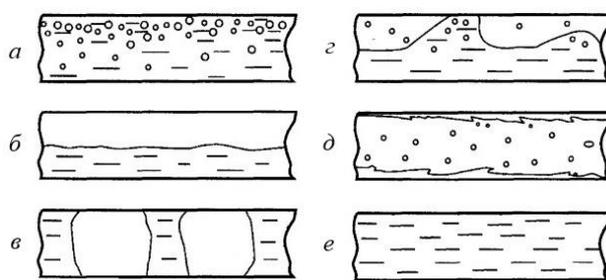
Основные режимы горизонтальных и вертикальных течений газожидкостных потоков описаны в [8]. Авторы выделяют пузырьковое, расслоенное (с гладкой или волновой поверхностью раздела), пробковое, пробко-дисперсное, пузырьково-пробковое, кольцевое, серповидное и дисперсное горизонтальные течения. Кроме перечисленных терминов указывается на существование снарядной эмульсионной, распыленной или вспененной структур. В сравнении с горизонтальными течениями у вертикальных отсутствует расслоенное и серповидное, а дисперсное обозначено как туманнообразное. Многими авторами были разработаны и предложены для практического использования диаграммы структур, в которых области существования тех или иных режимов наносятся на график с двумя независимыми координатами. Необходимо отметить, что в общем случае режим течения определяется множеством переменных и двумерная диаграмма не может обладать достаточной общностью представления областей существования режимов с различным механизмом течения.

Различные классификации структур газожидкостных потоков, из которых можно выделить основные для вертикальных (рис. 5) и горизонтальных (рис. 6) цилиндрических каналов, приведены в работах [3–9].



*a* – пузырьковый; *б* – пробковый (снарядный);  
*в* – вспененный; *г* – кольцевой (капельно-  
пленочный); *д* – клочкообразно-пленочный;  
*е* – туманнообразный

**Рисунок 5. – Режимы газожидкостных потоков в вертикальных каналах**



*a* – пузырьковый; *б* – расслоенный;  
*в* – пробковый (снарядный); *г* – смешанный;  
*д* – кольцевой; *е* – дисперсный

**Рисунок 6. – Режимы газожидкостных потоков в горизонтальных каналах**

Представленное разнообразие режимов газожидкостных потоков в трубопроводах (рис. 5, 6) подтверждает существенные физические отличия при движении газожидкостных смесей, которые непосредственно влияют на гидравлические потери потока. Именно поэтому в гидродинамике газожидкостных смесей в качестве первоочередной задачи выступает определение структуры (режима) движения газожидкостной смеси, определить которую можно визуально и (или) с использованием карт режимов (диаграмм структур) газожидкостных потоков. Возможность применения существующих диаграмм структур газожидкостных потоков для случая течения компрессионной пены, а также определение оптимальных условий для работы автоматической установки пожаротушения, генерирующей компрессионную пену, требует проведения экспериментальных исследований, что также обусловлено присутствием в газожидкостном потоке пенообразователя.

### **Экспериментальные методики определения режимов течения газожидкостных смесей в цилиндрическом канале.**

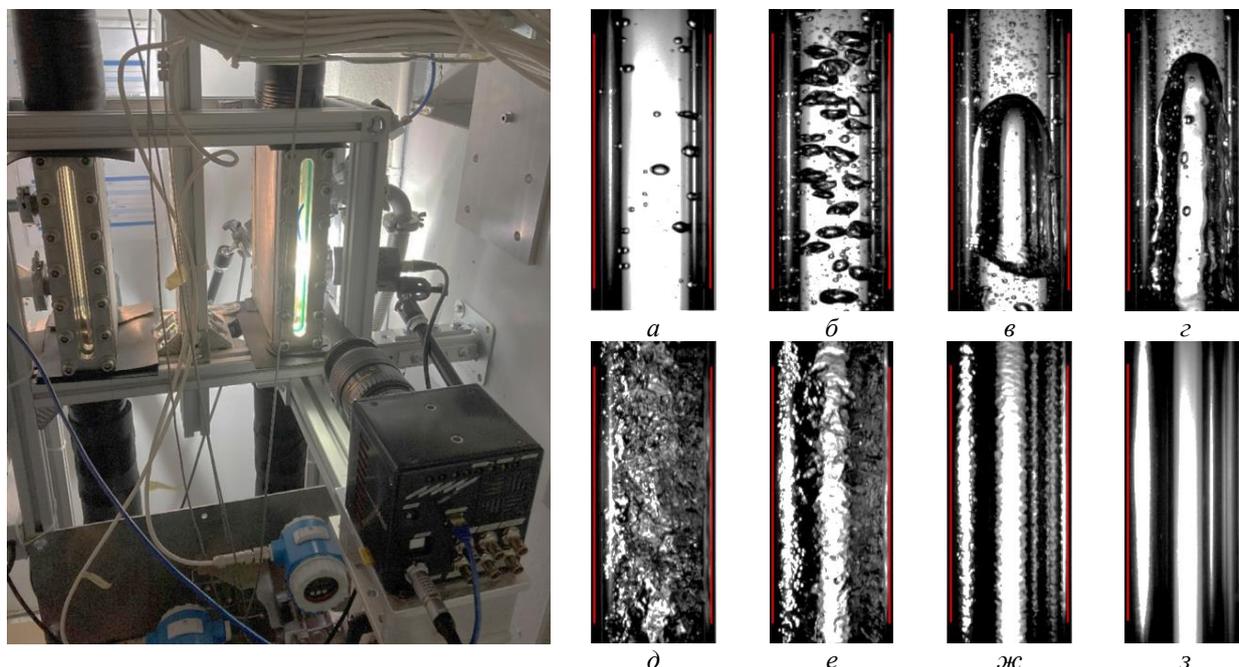
*Методики фотографирования.* Большое количество исследований газожидкостного потока проводилось в прозрачных трубах. В этих случаях характер течения можно наблюдать визуально. Фотографирование газожидкостного течения явилось естественным усовершенствованием метода визуального наблюдения [7]. Метод фотографирования позволил многим исследователям получить картины режимов течения. Режим газожидкостного течения, казавшийся бесформенным при визуальном наблюдении, становился выразительным на снимках, сделанных методом высокоскоростной фотографии. Результаты применения высокоскоростного фотографирования при исследовании газожидкостного потока описываются в работах [10–17].

Один из примеров экспериментальной установки для исследования режимов течения адиабатического двухфазного потока углекислого газа в вертикальных трубопроводах с применением методики фотографирования, а также зафиксированные режимы течения представлены на рисунке 7.

Обязательным элементом подобных установок является наличие оптически прозрачного участка. Фиксация генерируемого режима производится с помощью высокоскоростной камеры.

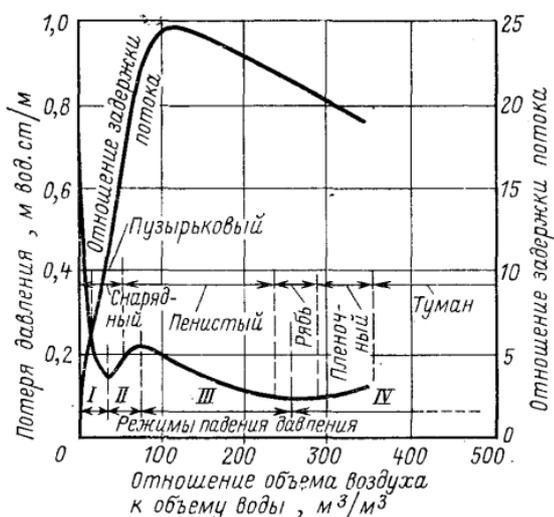
*Методики, базирующиеся на измерении перепада давления.* Одним из методов определения режимов течения двухфазного потока является установление зависимости режимов течения от того или иного измеряемого параметра, например, градиента давления

и объемного паросодержания или от изменения этих параметров во времени. Исследование зависимости режима течения от градиента давления (рис. 8) представлено авторами в работе [18], а в работе [7] – с дополнительным визуальным контролем и фотографированием потока (рис. 9).



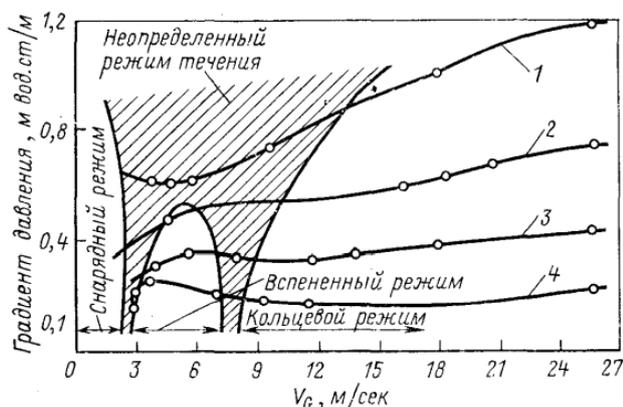
а, б – пузырьковый; в, з – пробковый; д – вспененный; е, ж – кольцевой; з – пар/туман. Качество пара увеличивается сверху слева вниз справа. Красные линии обозначают внутренние стенки трубы

**Рисунок 7.** – Экспериментальная установка и зафиксированные с использованием высокоскоростной камеры режимы течения двухфазного потока [17]



постоянная скорость потока  $v_L = 0,041$  м/с

**Рисунок 8.** – Зависимость между градиентом давления и режимом течения [18]



среднее давление  $2,1$  кгс/см<sup>2</sup> (0,21 МПа);

1 –  $v_L = 1,07$  м/с; 2 –  $v_L = 0,61$  м/с;

3 –  $v_L = 0,31$  м/с; 4 –  $v_L = 0,09$  м/с

**Рисунок 9.** – Зависимость между градиентом давления и характером течения газожидкостной смеси в 25-миллиметровой трубе [7]

Из рисунков 8 и 9 видно, что определенной связи между ходом кривой градиента давления и границами режимов течения не существует. Заштрихованная зона (рис. 9) не может быть четко определена из визуальных наблюдений.

**Методики зондирования.** Достаточно широкое распространение для определения перехода от одного режима течения к другому получили методы с использованием зондов,

которые вводятся в двухфазный поток. Наибольший интерес представляет зонд, обладающий электрической проводимостью [7].

В электропроводящем зонде металлическая игла (рис. 10а), полностью изолированная (за исключением острия), помещается в канале (обычно на осевой линии). При возникновении жидкостного моста, например при пробковом режиме течения, электропроводимость между концом зонда и стенкой трубы значительно выше электропроводимости в том случае, когда конец зонда окружен только газовой фазой. При этом более точные результаты получаются при измерении сопротивления между кончиками зондов (рис. 10б), а не сопротивления между зондом и стенкой трубы (рис. 10а) [7].

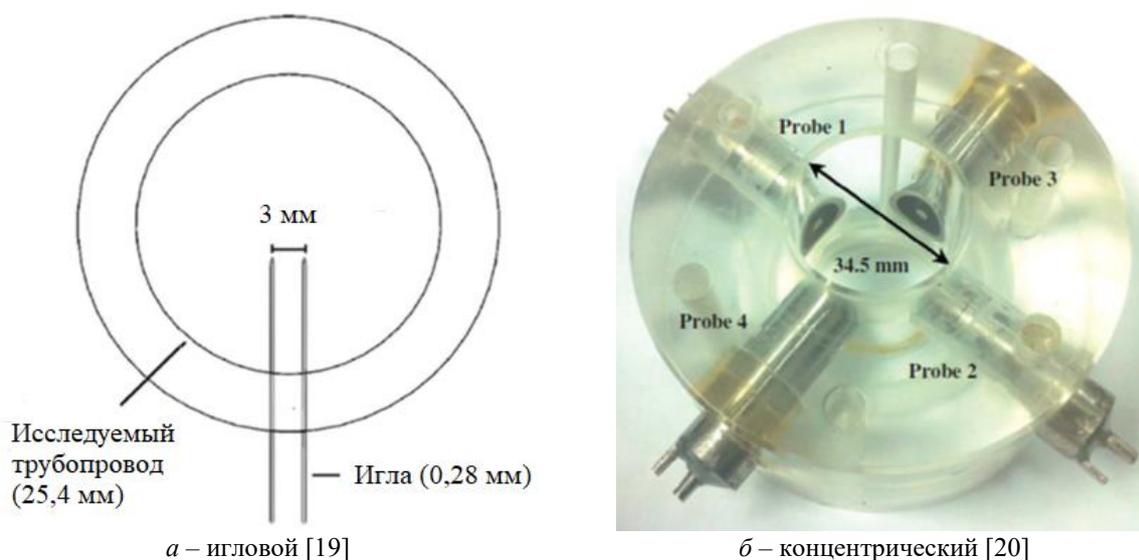


Рисунок 10. – Электропроводящие зонды

Трудности, возникающие при определении этим методом границ переходного режима течения, состоят в том, что контакт между зондами возникает даже в устойчивом кольцевом потоке, поскольку большие волны возмущения выбрасывают «языки» жидкости, которые затем разбиваются на капли. Наличие такого контакта было установлено за счет применения поперечных электропроводящих зондов для исследования средних толщин пленки и поверхностных волн в кольцевом потоке [21].

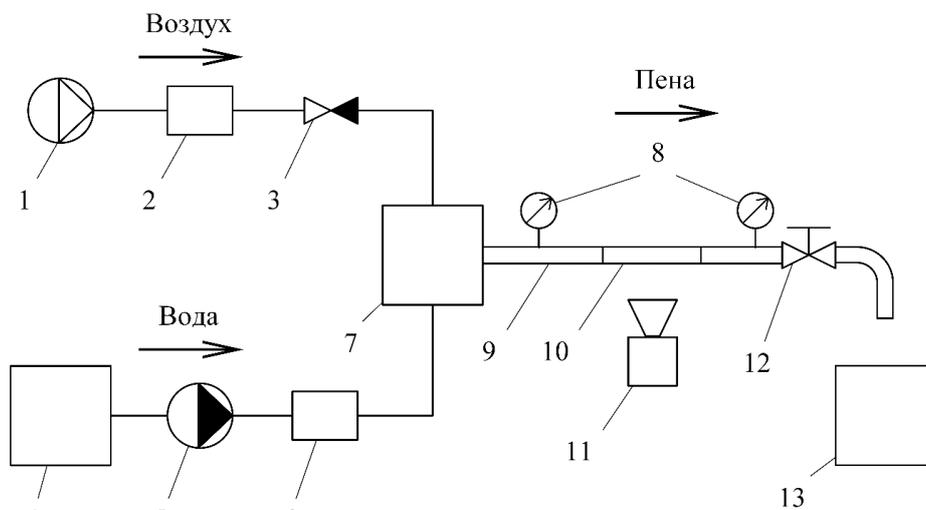
Таким образом, наблюдение двухфазных течений и их классификация довольно субъективны. Используемые методы могут включать высокоскоростную фотографию, исследования с помощью рентгеновского излучения и статистический анализ изменения величин, таких как локальное давление в системе, напряжение трения на стенке. Любую информацию о режимах течения следует рассматривать строго в рамках метода, которым она была получена. Оптимальным способом получения достоверной информации о движении газожидкостных потоков является использование комбинации методов [9].

Эффективность экспериментального исследования процесса течения газожидкостных смесей в трубопроводах во многом зависит от выбора методики постановки и обработки самого эксперимента, а также от конструкции экспериментальной установки. Ряд свойств газожидкостных течений в самой различной форме проявляется в зависимости от конструктивного исполнения гидравлического контура установки.

**Описание конструкции экспериментальной установки для исследования движения компрессионной пены в цилиндрическом канале.** На основании проведенного анализа разработана конструкция экспериментальной установки для исследования движения компрессионной пены в цилиндрическом канале, а также методика проведения экспериментальных исследований движения компрессионной пены в автоматических установках

пожаротушения, позволяющая определять различные режимы течения компрессионной пены в трубопроводах (цилиндрических каналах) автоматических установок пожаротушения.

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 11.



1 – компрессор; 2 – воздушный расходомер; 3 – обратный клапан; 4 – емкость для подготовки раствора пенообразователя; 5 – насос; 6 – расходомер раствора пенообразователя; 7 – смешивательная камера; 8 – датчики давления; 9 – исследуемый трубопровод; 10 – прозрачный участок трубопровода; 11 – высокоскоростная камера; 12 – сливное устройство с регулируемым расходом; 13 – емкость для пены

**Рисунок 11. – Принципиальная схема экспериментальной установки**

Для исключения влияния погрешности дозатора пенообразователя на результаты экспериментов рабочий раствор пенообразователя необходимой концентрации следует готовить предварительно в специальной емкости.

В автоматической установке пожаротушения компрессионной пеной Smart Foam группы компаний «СТАЛТ» запас воздуха хранится в баллонах высокого давления и подается через редуктор. Объем воздуха в баллонах ограничен, что приводит к необходимости их перезарядки в процессе эксплуатации. Это создает определенные трудности при проведении экспериментальных исследований. Поэтому для генерирования и подачи воздуха под давлением целесообразно использовать компрессор.

Смешивание рабочего раствора пенообразователя и воздуха производится в специальной смешивательной камере объемом 0,1 м<sup>3</sup>.

Движение компрессионной пены после выхода из смешивательной камеры предусматривается по трубопроводу диаметром 32 мм. Особенностью конструкции трубопровода является возможность его демонтажа для последующей замены на аналогичные по длине образцы с большим диаметром (40 и 50 мм). Длина горизонтальной части трубопровода составляет 10 м. В центральной части трубопровод имеет прозрачную поликарбонатную вставку длиной 0,5 м для возможности визуального наблюдения движущегося газожидкостного потока.

Для выпуска пены в конце трубопровода устанавливается сливное устройство, обеспечивающее необходимый расход.

С целью исследования движения компрессионной пены в цилиндрическом канале подобраны экспериментальное оборудование и средства измерений.

Для подачи раствора пенообразователя предлагается использовать вертикальный многоступенчатый насос высокого давления марки Calpeda MXV 50-1507<sup>6</sup>. Насос имеет

<sup>6</sup> Каталог нагнетательного оборудования Zenova (Российская Федерация) [Электронный ресурс] / Зенова – универсальный каталог нагнетательного оборудования. – Режим доступа: [http://zenova.ru/category/nasosy\\_vysokogo\\_davlenia/model/mxv-50-1507](http://zenova.ru/category/nasosy_vysokogo_davlenia/model/mxv-50-1507). – Дата доступа: 23.01.2023.

7 рабочих ступеней. Производительность насоса от 8,0 до 24,0 м<sup>3</sup>/ч (от 2,22 до 6,67 л/с). Оптимальная рабочая точка производительности 16,0 м<sup>3</sup>/ч (4,44 л/с) при давлении 73,5 метра водяного столба (0,72 МПа).

Для подачи воздуха предлагается использовать стационарный маслonaполненный винтовой компрессор, оснащенный ременным приводом, марки Cross Air CA 18,5-8GA<sup>7</sup>.

Чтобы определить избыточное давление в трубопроводе, предлагается использовать специальные трубопроводные вставки с датчиками давления, каждый из которых состоит из пьезоэлектрического преобразователя давления АИР-10Н и измерителя технологического цифрового ИТЦ 420/М4-1<sup>8</sup>. Измеритель технологический цифровой предназначен для измерения и индикации температуры и других физических величин, преобразованных в унифицированный сигнал постоянного тока 4...20 мА<sup>9</sup>. Работа измерителя основана на преобразовании входного аналогового сигнала (тока) в цифровую форму, на его обработке и отображении обработанной информации на цифровом семисегментном индикаторе.

Для определения расхода раствора пенообразователя предлагается использовать расходомер-счетчик электромагнитный «Взлет ЭМ (ПРОФИ)»<sup>10</sup>. Он предназначен для измерения среднего объемного расхода и объема различных электропроводящих жидкостей в широком диапазоне температур и вязкостей в различных условиях эксплуатации. Чувствительность расходомера по скорости потока составляет 0,02 м/с. Расходомер устанавливается на трубопроводе, подводящем раствор пенообразователя из резервуара к смесительной камере.

Для определения расхода воздуха предлагается использовать встраиваемый расходомер ЕЕ741<sup>11</sup>. Он предназначен для точного учета и контроля сжатого воздуха и технических газов. Скорость измеряемых значений расхода составляет 0,1 с. Расходомер устанавливается на трубопроводе, подводящем воздух от компрессора к смесительной камере.

С целью фиксации режимов течения компрессионной пены при проведении эксперимента предлагается использовать высокоскоростную камеру Evercam F 3000-32-C<sup>12</sup>. Камера применяется для записи быстро протекающих процессов, например дефлаграционного сгорания газо-, паро-, пылевоздушных смесей, формирования пузырьков огнетушащей пены при ударе струи огнетушащего раствора о тарелку оросителя автоматических установок пенного пожаротушения.

**Методика проведения экспериментальных исследований движения компрессионной пены в автоматических установках пожаротушения.** Методика экспериментальных исследований движения компрессионной пены в цилиндрическом канале устанавливает порядок определения режимов течения газожидкостной смеси при использовании экспериментальной установки, приведенной на рисунке 11. Сущность методики заключается в определении потерь давления по длине трубопровода путем установления разницы пока-

<sup>7</sup> Каталог товаров ООО «Зид Бай» (Республика Беларусь) [Электронный ресурс] / ООО «Зид Бай» строительное оборудование в Беларуси. – Режим доступа: [http://zid.by/catalog/Kompressory/Vintovye\\_kompressory/vintovoy\\_kompressor\\_cross\\_air\\_ca\\_18\\_5\\_8ga](http://zid.by/catalog/Kompressory/Vintovye_kompressory/vintovoy_kompressor_cross_air_ca_18_5_8ga). – Дата доступа: 23.01.2023.

<sup>8</sup> Каталог НПП «ЭЛЕМЕР» (Российская Федерация) [Электронный ресурс] / НПП «ЭЛЕМЕР». – Режим доступа: <https://www.elemer.ru/catalog/funktsionalnaya-apparatura/indikator-izmeriteli/itts-420-m4-1-m4-2/>. – Дата доступа: 23.01.2023.

<sup>9</sup> Измерители технологические цифровые ИТЦ 420/М4-1. Руководство по эксплуатации / НПП «ЭЛЕМЕР». – М., 2017. – 28 с.

<sup>10</sup> Каталог группы компаний «Взлет» (Российская Федерация) [Электронный ресурс] / ГК «Взлет». – Режим доступа: [https://vzljet.ru/catalogue/elektromagnitnyj\\_metod/vzlet\\_em\\_profi\\_m](https://vzljet.ru/catalogue/elektromagnitnyj_metod/vzlet_em_profi_m). – Дата доступа: 23.01.2023.

<sup>11</sup> Каталог ООО «Полтраф СНГ» (Российская Федерация) [Электронный ресурс] / ООО «Полтраф СНГ». – Режим доступа: [https://poltraf.ru/raskhod/ee741\\_modulnuu-\\_kompaktny/](https://poltraf.ru/raskhod/ee741_modulnuu-_kompaktny/). – Дата доступа: 23.01.2023.

<sup>12</sup> Производство высокоскоростных видеокамер Evercam (Российская Федерация) [Электронный ресурс] / Высокоскоростные камеры Evercam. – Режим доступа: <http://evercam.ru/produktsiya/8/273>. – Дата доступа: 23.01.2023.

заний измерительных приборов давления, а также фиксации режима течения компрессионной пены при заданных параметрах.

В ходе проведения экспериментальных исследований неизменными принимаются диаметр трубопровода и расстояние между приборами давления. Проведению эксперимента предшествует приготовление раствора пенообразователя необходимой концентрации в специальной емкости.

Осуществляется одновременный пуск насоса и компрессора с заданными параметрами. Расходы раствора пенообразователя и воздуха фиксируются с помощью соответствующих расходомеров. Параллельно движущиеся потоки раствора пенообразователя и воздуха доставляются в смесительную камеру, где происходит генерирование компрессионной пены. Готовая пена поступает в исследуемый трубопровод, где определяются потери давления по длине путем установления разницы показаний манометров, установленных в начальном и конечном участках. При этом в центральной части трубопровода компрессионная пена проходит прозрачный поликарбонатный участок, где с помощью высокоскоростной камеры фиксируется установившийся режим течения газожидкостного потока.

Сбор компрессионной пены осуществляется через сливное устройство в специальную емкость. После разрушения пены по истечении времени раствор пенообразователя можно использовать в установке повторно.

На основании полученных результатов строятся концентрационно-скоростные графики. Определяются критерии подобия (число Рейнольдса, число Вебера).

Для экспериментальных исследований предусмотрены три различных пенообразующих состава. Для случая использования каждого из пенообразующих составов проводятся серии измерений при различных расходах раствора пенообразователя в диапазоне производительности насоса. Количество параллельных измерений в серии – четыре.

Исследования проводятся для трех различных диаметров трубопроводов (32, 40 и 50 мм) по отдельности.

### **Заключение**

Разработанная экспериментальная установка и методика проведения экспериментальных исследований движения компрессионной пены в автоматических установках пожаротушения позволят установить закономерности падения давления по длине трубопровода при движении по ней компрессионной пены и определить на их основе величины удельных потерь давления для различных значений объемного расхода раствора пенообразователя, а также при каких параметрах формируется вспененный режим течения и создаются оптимальные условия для работы автоматической установки пожаротушения, влияют ли при этом на режим течения диаметр трубопровода и вид пенообразователя.

Проведение дальнейших исследований посредством описанной выше методики способствует разработке принципиально новой методики гидравлического расчета автоматических установок пожаротушения, генерирующих компрессионную пену.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Камлюк, А.Н. Пенные оросители для автоматических установок пожаротушения: монография / А.Н. Камлюк, А.О. Лихоманов, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, 2023. – 244 с.
2. Камлюк, А.Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений: монография / А.Н. Камлюк, А.В. Грачулин. – Минск: УГЗ, 2019. – 224 с.
3. Мамаев, В.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в трубах / В.А. Мамаев [и др.]. – М.: Недра, 1969. – 208 с.
4. Кутателадзе, С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
5. Марон, В.И. Гидродинамика однофазных и многофазных потоков в трубопроводе / В.И. Марон. – М.: МАКС Пресс, 2009. – 334 с.

6. Островский, Г.М. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / Г.М. Островский [и др.]. – СПб.: АНО НПО Профессионал, 2004. – Ч. 1. – 848 с.
7. Хьюитт, Дж.Ф. Кольцевые двухфазные течения: пер. с англ. / Дж.Ф. Хьюитт, Н.С. Холл-Тейлор. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.
8. Гриценко, А.И. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах / А.И. Гриценко, О.В. Клапчук, Ю.А. Харченко. – М.: Недра, 1994. – 238 с.
9. Справочник по теплообменникам: в 2 т. / пер. с англ. под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т. 1. – 560 с.
10. Arnold, C.R. Further developments in the photography of two-phase gas-liquid flow / C.R. Arnold, G.F. Hewitt // *Journal of Photographic Science*. – 1967. – Vol. 15, Iss. 3. – P. 97–114. – DOI: 10.1080/00223638.1967.11737388.
11. Coleman, J.W. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes / J.W. Coleman, S. Garimella // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1999. – Vol. 42, № 15. – P. 2869–2881. – DOI: 10.1016/S0017-9310(98)00362-7.
12. Cooper, K.D. Photography of two-phase gas-liquid flow / K.D. Cooper, G.F. Hewitt, B. Pinchin // *Journal of Photographic Science*. – 1964. – Vol. 12, Iss. 5. – P. 269–278. – DOI: 10.1080/00223638.1964.11737259.
13. Zhang, Zh. Experimental study on radial evolution of droplets in vertical gas-liquid two-phase annular flow / Zh. Zhang [et al.] // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2020. – Vol. 129. – Article 103325. – 9 p. – DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103325.
14. Takamasa, T. Experimental Study of gas-liquid two-phase flow affected by wall surface wettability / T. Takamasa, T. Hazuku, T. Hibiki // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2008. – Vol. 29, № 6. – P. 1593–1602. – DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.09.001.
15. Bhagwat, S.M. Similarities and differences in the flow patterns and void fraction in vertical upward and downward two phase flow / S.M. Bhagwat, A.J. Ghajar // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2012. – Vol. 39. – P. 213–227. – DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.01.026.
16. Dasgupta, A. Experimental investigation on dominant waves in upward air-water two-phase flow in churn and annular regime / A. Dasgupta [et al.] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2017. – Vol. 81. – P. 147–163. – DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.10.012.
17. Schmid, D. Flow pattern observations and flow pattern map for adiabatic two-phase flow of carbon dioxide in vertical upward and downward direction / D. Schmid [et al.] // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2022. – Vol. 131. – Article 110526. – 16 p. – DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2021.110526.
18. Govier G.W., Radford B.A., Dunn J.S.C. The upwards vertical flow of air-water mixtures. 1. Effect of air and water rates on flow pattern, hold-up pressure drop / G.W. Govier, B.A. Radford, J.S.C. Dunn // *Canadian Journal of Chemical Engineering*. – 1957. – Vol. 35. – P. 58–70.
19. Wang, G. Wave structure and velocity in vertical upward annular two-phase flow / G. Wang, Z. Dang, M. Ishii // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2021. – Vol. 120. – Article 110205. – 12 p. – DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110205.
20. Zhao. Y. Disturbance wave development in two-phase gas-liquid upwards vertical annular flow / Y. Zhao [et al.] // *International Journal of Multiphase Flow*. – 2013. – Vol. 55. – P. 111–129. – DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.04.001.
21. Hewitt, G.F. Liquid film and pressure drop studies / G.F. Hewitt, R.D. King, P.C. Lovegrove // *Chemical and Process Engineering*. – 1964. – Vol. 45. – P. 191–200.

**Методика экспериментального определения режимов течения компрессионной пены**  
**Methods of experimental determination of compression foam flow regimes**

**Шинкоренко Кирилл Евгеньевич**

Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра  
автоматических систем безопасности,  
преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь  
Email: kirill\_shinkorenko@inbox.ru  
ORCID: 0000-0003-4946-9339

**Kirill E. Shinkorenko**

State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Automatic Safety Systems,  
Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus  
Email: kirill\_shinkorenko@inbox.ru  
ORCID: 0000-0003-4946-9339

**Грачулин Александр Владимирович**

кандидат технических наук, доцент  
Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра автоматиче-  
ских систем безопасности,  
старший преподаватель

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь  
Email: grachulin\_a@mail.ru  
ORCID: 0000-0003-3832-8258

**Alexandr V. Grachulin**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Automatic Safety Systems,  
Senior Lecturer

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus  
Email: grachulin\_a@mail.ru  
ORCID: 0000-0003-3832-8258

**Рябцев Виталий Николаевич**

кандидат технических наук, доцент  
Государственное учреждение образования  
«Университет гражданской защиты  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь», кафедра  
автоматических систем безопасности,  
начальник кафедры

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,  
220118, г. Минск, Беларусь  
Email: v.reabtsev@ucp.by  
ORCID: 0000-0002-2830-591X

**Vitaliy N. Ryabtsev**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
State Educational Establishment «University  
of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus»,  
Chair of Automatic Safety Systems,  
Head of the Chair

Address: Mashinostroiteley str., 25,  
220118, Minsk, Belarus  
Email: v.reabtsev@ucp.by  
ORCID: 0000-0002-2830-591X

## METHODS OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF COMPRESSION FOAM FLOW REGIMES

**Shinkorenko K.E., Grachulin A.V., Ryabtsev V.N.**

*Purpose.* To analyze the methods for determining the flow regimes of gas-liquid mixtures in a cylindrical channel. On the basis of the analysis carried out, to develop a methodology for conducting experimental studies of the movement of compression foam in automatic fire extinguishing installations.

*Methods.* In the course of the work, the main theoretical and empirical research methods were used, as well as general scientific research methods (analysis, systematization).

*Findings.* The design of the experimental installation and the methodology for conducting experimental studies of the movement of compression foam in automatic fire extinguishing installations have been developed.

*Application field of research.* Development of a method for hydraulic calculation of automatic fire extinguishing installations generating compression foam.

*Keywords:* automatic fire extinguishing installation, hydraulic calculation, pipeline, gas-liquid mixture, two-phase flow, pressure, consumption.

(The date of submitting: February 8, 2023)

### REFERENCES

1. Kamlyuk A.N., Likhomanov A.O., Grachulin A.V. *Pennye orositeli dlya avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya* [Foam sprinklers for automatic fire extinguishing installations]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2023. 244 p. (rus)
2. Kamlyuk A.N., Grachulin A.V. *Kompressionnaya pena dlya nuzhd pozharnykh podrazdeleniy* [Compression foam for the needs of fire departments]: monograph. Minsk: University of Civil Protection, 2019. 224 p. (rus)
3. Mamaev V.A., Odishariya G.E., Semenov N.I., Tochigin A.A. *Gidrodinamika gazo-zhidkostnykh smesey v trubakh* [Hydrodynamics of gas-liquid mixtures in pipes]. Moscow: Nedra, 1969. 208 p. (rus)
4. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moscow: Energiya, 1976. 296 p. (rus)
5. Maron V.I. *Gidrodinamika odnofaznykh i mnogofaznykh potokov v truboprovode* [Hydrodynamics of single-phase and multi-phase flows in a pipeline]. Moscow: MAKS Press, 2009. 334 p. (rus)
6. Ostrovskiy G.M. [et al.]. *Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologiy* [New handbook of chemist and technologist. Processes and apparatuses of chemical technologies]. Saint Petersburg: ANO NPO Professional, 2004. Part 1. 848 p. (rus)
7. Hewitt G., Hall-Taylor N.S. *Kol'tsevye dvukhfaznye techeniya* [Annular two-phase flows]: translated from English. Moscow: Energiya, 1974. 408 p. (rus)
8. Gritsenko A.I., Klapchuk O.V., Kharchenko Yu.A. *Gidrodinamika gazozhidkostnykh smesey v skvazhinakh i truboprovodakh* [Hydrodynamics of gas-liquid mixtures in wells and pipelines]. Moscow: Nedra, 1994. 238 p. (rus)
9. *Spravochnik po teploobmennikam* [Handbook of heat exchangers]: in 2 vol. Translated from English. Ed. by B.S. Petukhov, V.K. Shikov. Moscow: Energoatomizdat, 1987. Vol. 1. 560 p. (rus)
10. Arnold C.R., Hewitt G.F. Further developments in the photography of two-phase gas-liquid flow. *Journal of Photographic Science*, 1967. Vol. 15, Iss. 3. Pp. 97–114. DOI: 10.1080/00223638.1967.11737388.
11. Coleman J.W., Garimella S. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999. Vol. 42, № 15. Pp. 2869–2881. DOI: 10.1016/S0017-9310(98)00362-7.
12. Cooper K.D., Hewitt G.F., Pinchin B. Photography of two-phase gas-liquid. *Journal of Photographic Science*, 1964. Vol. 12, Iss. 5. Pp. 269–278. DOI: 10.1080/00223638.1964.11737259.
13. Zhang Zh., Li Yu., Wang Zh., Hu Q., Wang D. Experimental study on radial evolution of droplets in vertical gas-liquid two-phase annular flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020. Vol. 129. Article 103325. 9 p. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103325.

14. Takamasa T., Hazuku T., Hibiki T. Experimental Study of gas-liquid two-phase flow affected by wall surface wettability. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008. Vol. 29, № 6. Pp. 1593–1602. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.09.001.
15. Bhagwat S.M., Ghajar A.J. Similarities and differences in the flow patterns and void fraction in vertical upward and downward two phase flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012. Vol. 39. Pp. 213–227. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2012.01.026.
16. Dasgupta A., Chandraker D.K., Kshirasagar S., Reddy B.R., Rajalakshmi R., Nayak A.K., Walker S.P., Vijayan P.K., Hewitt G.F. Experimental investigation on dominant waves in upward air-water two-phase flow in churn and annular regime. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017. Vol. 81. Pp. 147–163. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2016.10.012.
17. Schmid D., Verlaat B., Petagna P., Revellin R., Schiffmann J. Flow pattern observations and flow pattern map for adiabatic two-phase flow of carbon dioxide in vertical upward and downward direction. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2022. Vol. 131. Article 110526. 16 p. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2021.110526.
18. Govier G.W., Radford B.A., Dunn J.S.C. The upwards vertical flow of air-water mixtures. 1. Effect of air and water rates on flow pattern, hold-up pressure drop. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1957. Vol. 35. Pp. 58–70.
19. Wang G., Dang Zh., Ishii M. Wave structure and velocity in vertical upward annular two-phase flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021. Vol. 120. Article 110205. 12 p. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110205.
20. Zhao Yu., Markides Ch.N., Matar O.K., Hewitt G.F. Disturbance wave development in two-phase gas-liquid upwards vertical annular flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2013. Vol. 55. Pp. 111–129. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.04.001.
21. Hewitt G.F., King R.D., Lovegrove P.C. Liquid film and pressure drop studies. *Chemical and Process Engineering*, 1964. Vol. 45. Pp. 191–200.