

УДК 303.447.352.4 : 614.842.615

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ПЕНЫ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Грачулин А.В.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: Grachulin_A@mail.ru

Авторами описана экспериментальная установка для исследования движения компрессионной пены по рукавной системе пеногенерирующих систем со сжатым воздухом. Предложена методика проведения данных исследований. Приведены предварительные экспериментальные результаты изменения давления, газосодержания, плотности и скорости по длине горизонтальной рукавной линии при движении компрессионной пены. Проведен анализ полученных результатов.

The authors described the experimental installation for research of the movement of compressed air foam in the hose line of compressed air foam system. Proposed the technique of these research. Are given preliminary experimental results of change of pressure, gas content, density and velocity along the hose line when moving compression foam. The analysis of the results.

(Поступила в редакцию 11 января 2016 г.)

Введение. Воздушно-механические пены представляют собой дисперсные системы, состоящие из пузырьков воздуха, окруженных пленками жидкости. Для их получения используют специальные устройства (генераторы) и растворы воды с пенообразователями (далее – ПО) на основе поверхностно-активных веществ. Различают воздушно-механические пены низкой кратности (до 30), средней кратности (30–200) и высокой кратности (более 200) [1]. Воздушно-механические пены широко используются при тушении пожаров класса А (твердые вещества) и класса В (жидкие вещества). К достоинствам пен следует отнести:

- сокращение расхода воды на пожаротушение (наличие воздуха в составе пены увеличивает общий объем огнетушащего вещества);
- возможность тушения пожаров на больших площадях (пена растекается по поверхности горячего материала);
- возможность объемного пожаротушения (для пен средней и высокой кратности);
- повышенная в сравнении с водой смачивающая способность (наличие в составе ПО).

Одним из перспективных способов получения воздушно-механической пены низкой кратности является использование пеногенерирующих систем со сжатым воздухом (далее – ПССВ). Принцип получения пены в ПССВ заключается в принудительном введении воздуха под давлением в раствор пенообразователя с помощью компрессора. Полученную таким образом пену называют компрессионной.

Основными компонентами ПССВ являются центробежный насос, источник воды (цистерна), источник ПО (бак для ПО), воздушный компрессор, система дозирования с прямым впрыском ПО на выходе из центробежного насоса, смесительная камера и устройство контроля за смешением ПО, воды и воздуха в требуемых пропорциях. В отличие от стандартных насосных установок в ПССВ по рукавной линии подается газожидкостная смесь (пена).

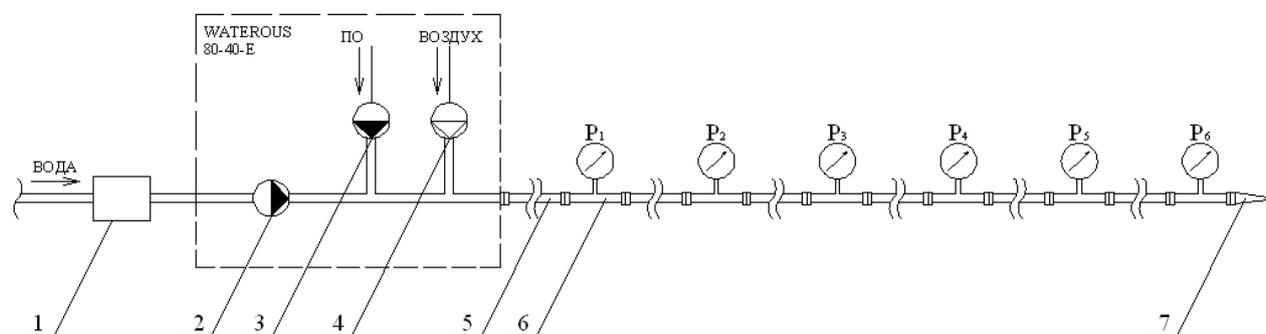
Результаты проведенных ранее исследований показывают, что ПССВ имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными технологиями пожаротушения: экономичность, многофункциональность, высокая эффективность [2–5]. ПССВ может быть использована для тушения пожаров в высотных зданиях (высотой до 400 м) [6, 7] и тушения пожаров в резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов методом введения компрессионной пены в слой горючей жидкости (подслойное тушение) [8].

Наличие в компрессионной пене воздуха обуславливает ее сжимаемость и, как следствие, неоднородность смеси по длине рукавной линии. В настоящее время движение

двухфазных потоков огнетушащих веществ по рукавным линиям изучено слабо. Отсутствуют какие-либо данные о механизме их течения и определении гидродинамического сопротивления при движении пены в рукавной линии.

В связи с вышесказанным необходимо исследовать движение компрессионной пены в горизонтальном цилиндрическом канале экспериментально. Для этого предлагается методика проведения исследований по измерению потерь давления в насосно-рукавных системах ПССВ. Результаты экспериментальных исследований могут лечь в основу разработки методики для расчета потерь давления в насосно-рукавной системе ПССВ при подаче компрессионной пены. Это позволит определить тактико-технические возможности ПССВ и сформулировать рекомендации по ее эффективному использованию пожарными подразделениями.

Описание экспериментальной установки. В ходе проведения экспериментальных исследований движения компрессионной пены в горизонтальном цилиндрическом канале за основу взята экспериментальная установка, описанная в работе [9]. Общая схема размещения средств измерения и оборудования при определении потерь давления в насосно-рукавных системах ПССВ представлена на рисунке 1.



- 1 – электромагнитный расходомер; 2 – водяной насос; 3 – насос пенообразователя; 4 – компрессор;
5 – рукавная линия; 6 – рукавная вставка с преобразователем давления; 7 – ручной пожарный ствол

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Как было отмечено в [10], по мере продвижения пены в рукавной линии происходит падение давления, что в свою очередь приводит к расширению находящегося в потоке воздуха. Как следствие, уменьшается плотность пены и возрастает скорость движения потока, что позволяет предположить, что падение напора по длине рукавной линии при движении по ней пены не будет линейным, как при движении воды.

При проведении эксперимента использовали рукавную линию, состоящую из 6 рукавов. Первый рукав (от ПССВ) служил для окончательного перемешивания компонентов пены и обеспечивал расположение рукавных вставок с преобразователями давления на одинаковом уровне по вертикали. Далее в рукавную линию для фиксации характера изменения давления устанавливали последовательно между рукавами 6 рукавных вставок с преобразователями давления (см. рисунок 1). Таким образом, в эксперименте исследовали линейный горизонтальный участок рукавной линии из 5 рукавов. Считаем, что этого количества будет достаточно, так как в практике пожаротушения рукавные линии с внутренним диаметром 38 и 51 мм зачастую состоят из 2–3 рукавов. Стоит отметить, что при проведении экспериментальных исследований рассматривали потери давления по длине рукавной линии, а потерями давления из-за местных сопротивлений пренебрегали в меру их малости.

При выполнении исследований применяли экспериментальное оборудование в соответствии с таблицей 1 и средства измерений в соответствии с таблицей 2.

Методика проведения исследований потерь давления в насосно-рукавных системах ПССВ. Настоящая методика выполнения измерений устанавливает порядок проведения исследований по измерению потерь давления в насосно-рукавных системах. Сущность методики заключается в определении потерь давления по длине рукавной линии путем установления разницы показаний измерительных приборов давления.

Таблица 1 – Экспериментальное оборудование

Наименование оборудования	Характеристика оборудования
ПССВ Waterous 80-40-E:	
– водяной насос	расход воды не более 5 л/с.
– компрессор	расход атмосферного воздуха 20 л/с.
– система дозирования пенообразователя Aquis™ 1.5	обеспечивает концентрацию ПО в потоке 0,1-1 % (автоматический режим); расход ПО не более 0,06 л/с при давлении 3 МПа (ручной режим).
Перекрывной ручной пожарный ствол Elkhart Brass ST-185A	диаметр насадков: 13 мм; 24 мм; 38 мм.
Рукавная вставка с манометром	внутренний диаметр – 50 мм; длина – 250 мм; соединительные головки – ГМ-50.
Рукава пожарные напорные	длина – 20±1 м; внутренний диаметр – 38 и 51 мм.
Переходные головки	с американского типа соединения на ГМ-50.
Мерная емкость	объем – 22 дм ³ , масса – 0,71 кг.

Таблица 2 – Средства измерений

Средство измерений	Диапазон измерения	Пределы допускаемой погрешности	Характеристика измеряемых величин
Расходомер-счетчик электромагнитный «ВЗЛЕТ ЭМ» модификации ПРОФИ ($D_y = 80$ мм)	2,717–217,3 м ³ /ч	относительная – ±1 %	средний объемный расход воды
Преобразователь давления измерительный АИР-10Н (модель 1160)	0–1 МПа	приведенная – ±0,15 % (±1,5кПа)	измерение избыточного давления и преобразование в унифицированный выходной токовый сигнал 4-20 мА
Измеритель технологический цифровой ИТЦ 420/М4-1	0–1 МПа	приведенная – ±0,11 % (±1,1кПа)	индикация избыточного давления, преобразованного в унифицированный сигнал постоянного тока 4-20 мА
Рулетка измерительная металлическая	0–30 м	относительная – ±[0,40+0,20(L-1)], где L – число полных и неполных метров в отрезке	длина рукавной линии
Весы ВН-15	010–15 кг	±20 г	масса мерной емкости с пеной

Примечание: средства измерений на период проведения исследований имело действующие аттестаты, свидетельства о поверке и/или калибровке. Условия проведения исследований соответствовали условиям эксплуатации измерительного оборудования.

Прежде, чем выполнять исследования, необходимо собрать и установить на ровной поверхности экспериментальную установку в соответствии со схемой (рисунок 1). Рукавную линию с одинаковым внутренним диаметром развернуть вдоль прямой линии, не допуская изгибов и заломов. С помощью рулетки измерить длину рукавной линии между точками установки преобразователей давления. Качество сборки, регулировки и комплектности контролировать визуально. Конструктивные элементы установки, оборудование и другие сборочные единицы и комплектующие должны быть надежно закреплены.

Методика проведения исследований заключается в следующем:

1. Установить на ручной пожарный ствол 7 насадок с диаметром 13 мм.
2. Запустить ПССВ в соответствии с инструкцией по применению и вывести систему на рабочий режим.
3. Подать в рукавную линию пену при рабочем давлении 0,5±0,1 МПа (определяется манометром на приборной доске ПССВ). Дождаться, пока поток пены примет установившийся режим (необходимо дождаться, пока показания электромагнитного расходомера 1 выровняются).
4. Зафиксировать показания электромагнитного расходомера 1.

5. Одновременно зафиксировать значения давления в рукавной линии (показания всех измерителей технологических цифровых ИТЦ 420/M4-1, установленных на рукавных вставках 6).

6. Определить потери давления по длине измеряемого участка рукавной линии:

$$\Delta p_{\text{уч}} = p_i - p_n, \quad (1)$$

где $\Delta p_{\text{уч}}$ – потери давления по длине участка рукавной линии между точкой установки i -го и n -го преобразователей давления, кПа; p_i – показания i -го преобразователя давления, кПа; p_n – показания n -го преобразователя давления, кПа.

7. Определить удельные потери давления:

$$\Delta p_{\text{уд}} = \Delta p_{\text{рук}} / l_{i-n}, \quad (2)$$

где $\Delta p_{\text{уд}}$ – удельные потери давления, кПа/м; l_{i-n} – участка рукавной линии между точкой установки i -го и n -го преобразователей давления, м.

8. Произвести отбор пены из рукавной линии в мерную емкость. Для этого аккуратно открыть вентиль рукавной вставки 6 и, не допуская разбрызгивания, собрать пену, выходящую из вентиля, в мерную емкость. Взвесить мерную емкость с пеной.

9. Определить массу отобранной пены:

$$m_{\text{пен}} = m_{\text{изм}} - m_{\text{емк}}, \quad (3)$$

где $m_{\text{изм}}$ – измеряемая масса мерной емкости с пеной, кг; $m_{\text{емк}}$ – масса пустой мерной емкости, кг.

10. Количество параллельных измерений в серии должно быть не менее трех. За результаты измерений избыточного давления, расхода воды и массы мерной емкости с пеной принять среднее арифметическое значений соответствующих измерений.

11. Изменить положение задвижки, регулирующей расход воды, и выполнить действия, указанные в пунктах 3–10 настоящей методики.

12. Снять со ствола 7 насадок с диаметром 13 мм и установить насадок с диаметром 24 мм. Выполнить действия, указанные в пунктах 2–11 настоящей методики.

13. Снять со ствола 7 насадок с диаметром 24 мм и установить насадок с диаметром 38 мм. Выполнить действия, указанные в пунктах 2–11 настоящей методики.

Изложенная выше методика проведения исследований предусматривает в каждой серии прямые измерения объемного расхода воды, избыточного давления в рукавной линии, а также массы генерируемой пены. Помимо того, исходя из положения регулятора системы дозирования ПО, определяется объемный расход ПО. Постоянными для каждой серии измерений, в рамках исследования рукавов конкретного внутреннего диаметра, остаются условия окружающей среды, характеристики используемых веществ и оборудования, длина рукавной линии между рукавными вставками, массовый расход воздуха, объемный расход воздуха из атмосферы.

Помимо прямых измерений, в рамках настоящей методики проведения исследований определили по [12]:

газосодержание смеси по формуле

$$\varphi_i = \frac{Q_{\text{возд}}^{\text{атм}} \cdot p_{\text{атм}}}{Q_{\text{возд}}^{\text{атм}} \cdot p_{\text{атм}} + (Q_{\text{вод}} + Q_{\text{ПО}}) \cdot (p_{\text{атм}} + p_i)}, \quad (4)$$

где φ_i – газосодержание смеси в точке установки i -го преобразователя давления, $Q_{\text{возд}}^{\text{атм}}$ – объемный расход воздуха из атмосферы (20 л/с), $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление (101,325 кПа), $Q_{\text{вод}}$ – объемный расход воды, л/с; $Q_{\text{ПО}}$ – объемный расход ПО, л/с; p_i – значение избыточного давления в рукавной линии в точке установки i -го преобразователя давления, кПа;

плотность газожидкостной смеси по формуле

$$\rho_{см i} = \rho_{р-ра} \cdot (1 - \varphi_i) + \rho_{воз}^{атм} \frac{(p_i + p_{атм})}{p_{атм}} \cdot \varphi_i, \quad (5)$$

где $\rho_{см i}$ – плотность газожидкостной смеси в точке установки i -го преобразователя давления, кг/м³; $\rho_{воз}^{атм}$ – плотность воздуха при атмосферном давлении (1,2 кг/м³);
 среднюю скорость потока газожидкостной смеси по формуле

$$v_{см i} = \frac{4Q_{вод}}{\pi d^2 \cdot (1 - \varphi_i)}, \quad (6)$$

где $v_{см i}$ – средняя скорость потока газожидкостной смеси в точке установки i -го преобразователя давления, м/с; d – внутренний диаметр исследуемых рукавов, м.

Также находили кратность пены по определению

$$K = \frac{V_{пен}}{V_{р-ра}} = \frac{V_{пен} \cdot \rho_{р-ра}}{m_{р-ра}}, \quad (7)$$

где K – кратность генерируемой пены, $V_{пен}$ – объем мерной емкости, м³; $V_{р-ра}$ – объем раствора, пошедшего на образование пены, м³; $m_{р-ра} = m_{пен}$ – масса раствора воды с ПО, кг; $\rho_{р-ра}$ – плотность раствора воды с ПО, кг/м³.

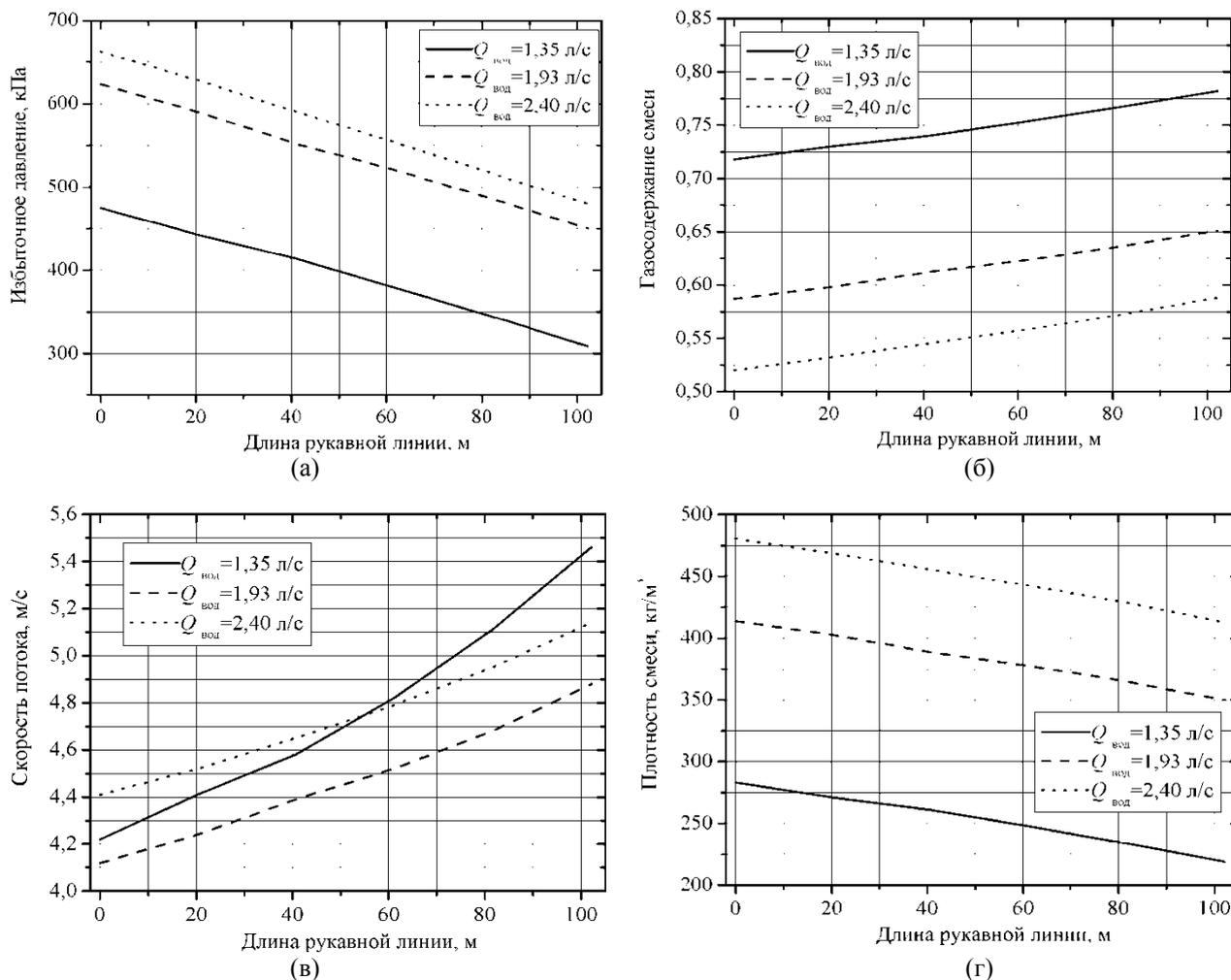


Рисунок 2 – Изменение давления (а), газосодержания (б), скорости (в) и плотности (г) по длине рукавной линии с внутренним диаметром 38 мм при использовании насадка с диаметром spryska 13 мм

Результаты и обсуждение. Экспериментальные исследования движения компрессионной пены в горизонтальном цилиндрическом канале проводились с использованием

пенообразователя общего назначения «СИНТЕК 6 НС». Концентрация ПО в растворе составляла около 2 %.

В первую очередь рассмотрим рукавную линию с внутренним диаметром 38 мм. Длина участков рукавной линии между точками установки преобразователей давления составила $l_{1-2} = 20,28$ м, $l_{2-3} = 20,43$ м, $l_{3-4} = 20,35$ м, $l_{4-5} = 20,44$ м, $l_{5-6} = 20,66$ м. Результаты экспериментальных исследований движения пены по данной рукавной линии представлены на рисунках 2–4.

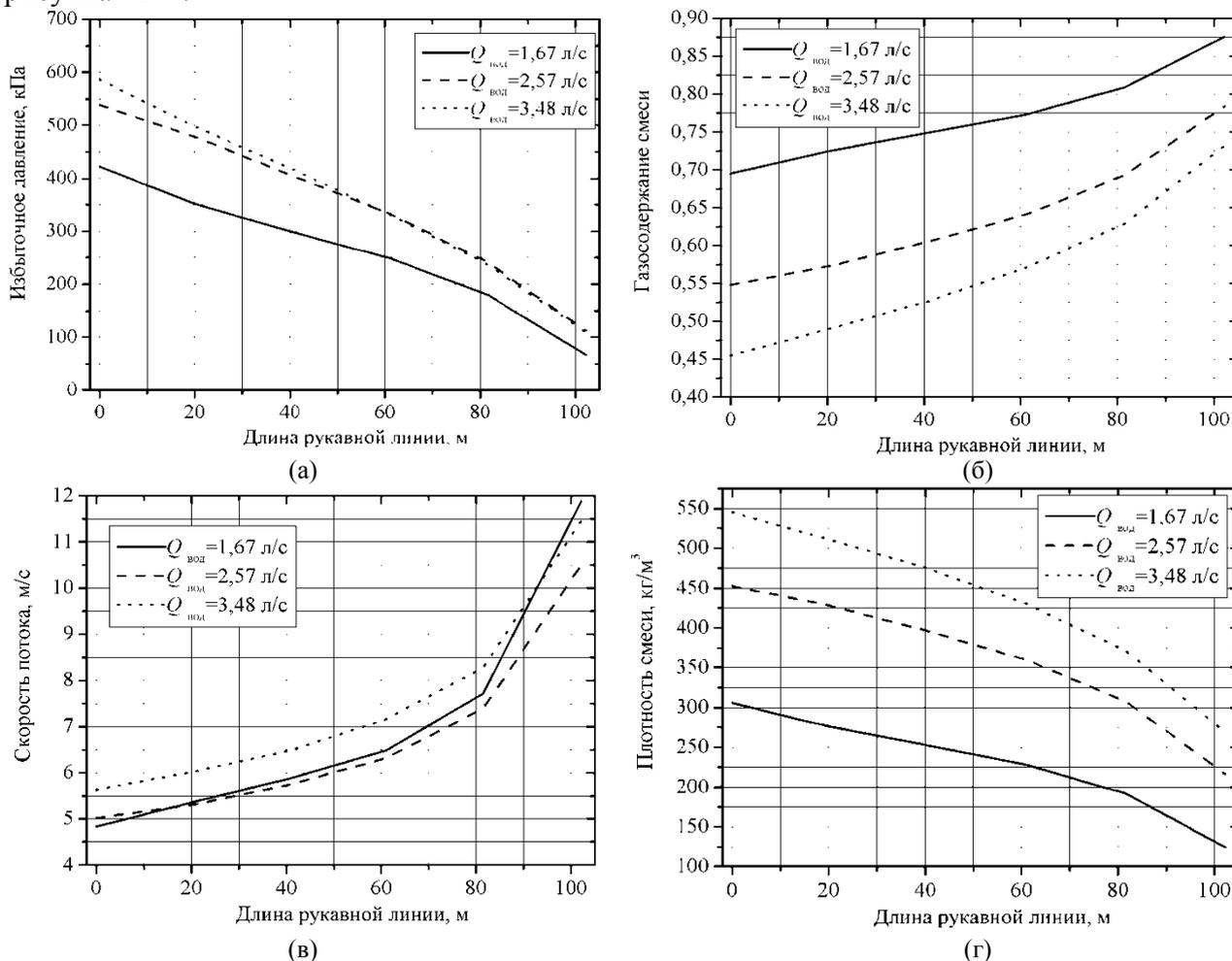
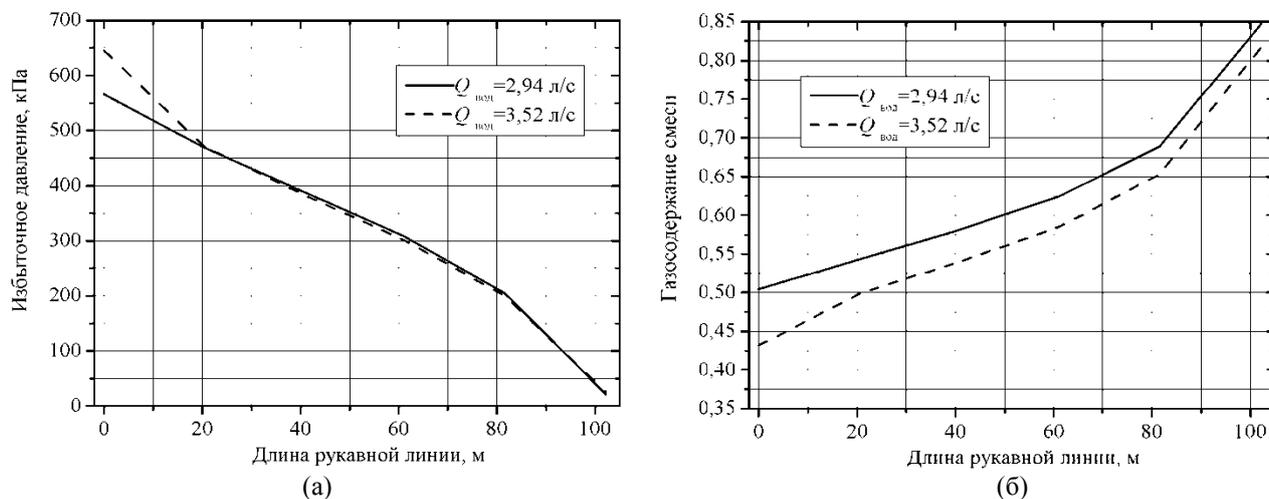


Рисунок 3 – Изменение давления (а), газосодержания (б), скорости (в) и плотности (г) по длине рукавной линии с внутренним диаметром 38 мм при использовании насадка с диаметром spryska 23 мм



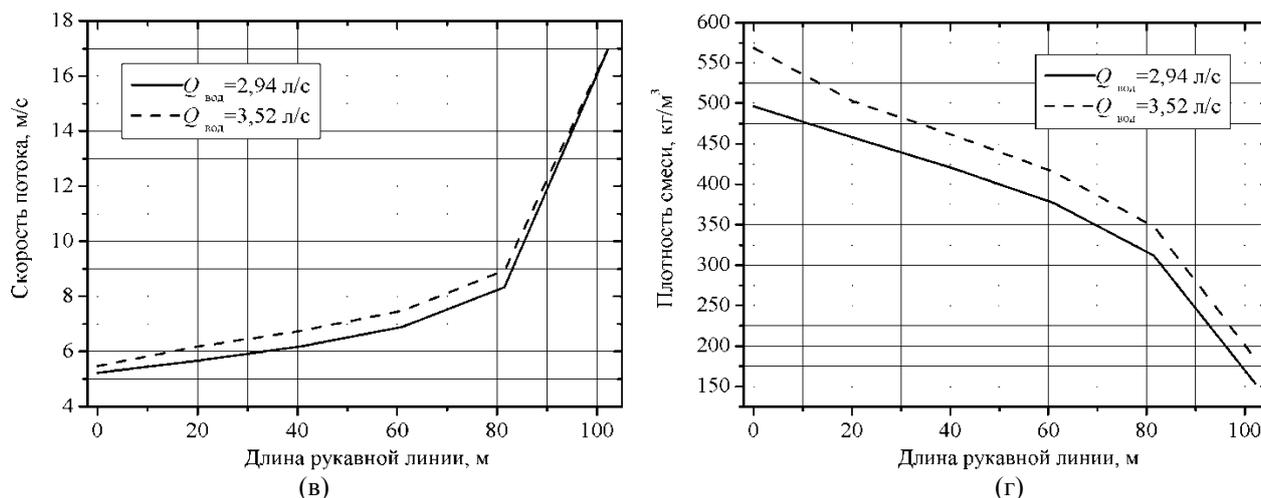


Рисунок 4 – Изменение давления (а), газосодержания (б), скорости (в) и плотности (г) по длине рукавной линии с внутренним диаметром 38 мм при использовании насадка с диаметром spryska 38 мм

Зависимость изменения давления по длине рукавной линии при использовании насадка с диаметром spryska 13 мм (рисунок 2а) имеет линейный вид. При использовании насадков с диаметром spryska 23 и 38 мм (рисунок 3а и 4а соответственно) эти зависимости в некотором приближении также можно считать линейными. Это позволило предварительно оценить удельные потери давления в рукавной линии $\Delta p_{\text{уд}}$ по формуле (2) для участка $l_{1-6} = 102,16 \text{ м}$ (таблица 3).

Таблица 3 – Удельные потери давления по длине рукавной линии с внутренним диаметром 38 мм

Диаметр насадка, мм	Расход воды, л/с	Удельные потери давления, кПа/м
13	1,35	1,63
	1,93	1,69
	2,40	1,79
23	1,67	3,47
	2,57	4,17
	3,48	4,67
38	2,94	5,33
	3,52	6,07

Из таблицы 3 видно, что удельные потери давления возрастают при увеличении диаметра spryska используемого насадка. Помимо того, при использовании насадка с диаметром spryska 13 мм значение удельных потерь давления растет с увеличением расхода воды, однако этот рост не столь значителен, как в случае использования насадков с диаметром spryska 23 и 38 мм. Это связано в первую очередь с тем, что газонасыщение смеси в первом случае (рисунок 2б) изменяется по длине рукавной линии на 6,4 %, а во втором (рисунки 3б и 4б) – на 18,1 % и 35,7 % соответственно.

Из рисунка 2в видно, что при большем расходе воды (2,40 л/с) значение начальной скорости потока выше, чем при меньшем расходе (1,35 л/с). Однако в конце рукавной линии значение скорости потока выше для случая с меньшим расходом воды (1,35 л/с). Это говорит о том, что ускорение потока компрессионной пены по рукавной линии зависит от газосодержания смеси. Это подтверждается при анализе рисунков 3в и 4в.

Теперь рассмотрим рукавную линию с внутренним диаметром 51 мм. Длина участков рукавной линии между точками установки преобразователей давления составила $l_{1-2} = 20,03 \text{ м}$, $l_{2-3} = 20,74 \text{ м}$, $l_{3-4} = 20,40 \text{ м}$, $l_{4-5} = 19,75 \text{ м}$, $l_{5-6} = 20,44 \text{ м}$. Результаты экспериментальных исследований движения пены по данной рукавной линии представлены на рисунках 5–7.

Рисунки 5–7 подтверждают, что закон изменения давления по длине рукавной линии близок к линейному. Это позволило предварительно оценить удельные потери давления в рукавной линии $\Delta p_{\text{уд}}$ по формуле (2) для участка $l_{1-6} = 101,36 \text{ м}$ (таблица 4).

Таблица 4 – Удельные потери давления по длине рукавной линии с внутренним диаметром 38 мм

Диаметр насадка, мм	Расход воды, л/с	Удельные потери давления, кПа/м
13	1,70	0,82
	2,37	0,76
	3,09	0,85
23	1,50	1,28
	2,57	1,27
	3,11	1,48
38	1,95	1,56
	3,18	1,74
	4,68	2,53

В целом результаты исследования рукавной линии с внутренним диаметром 51 мм аналогичны результатам исследования рукавной линии с внутренним диаметром 38 мм.

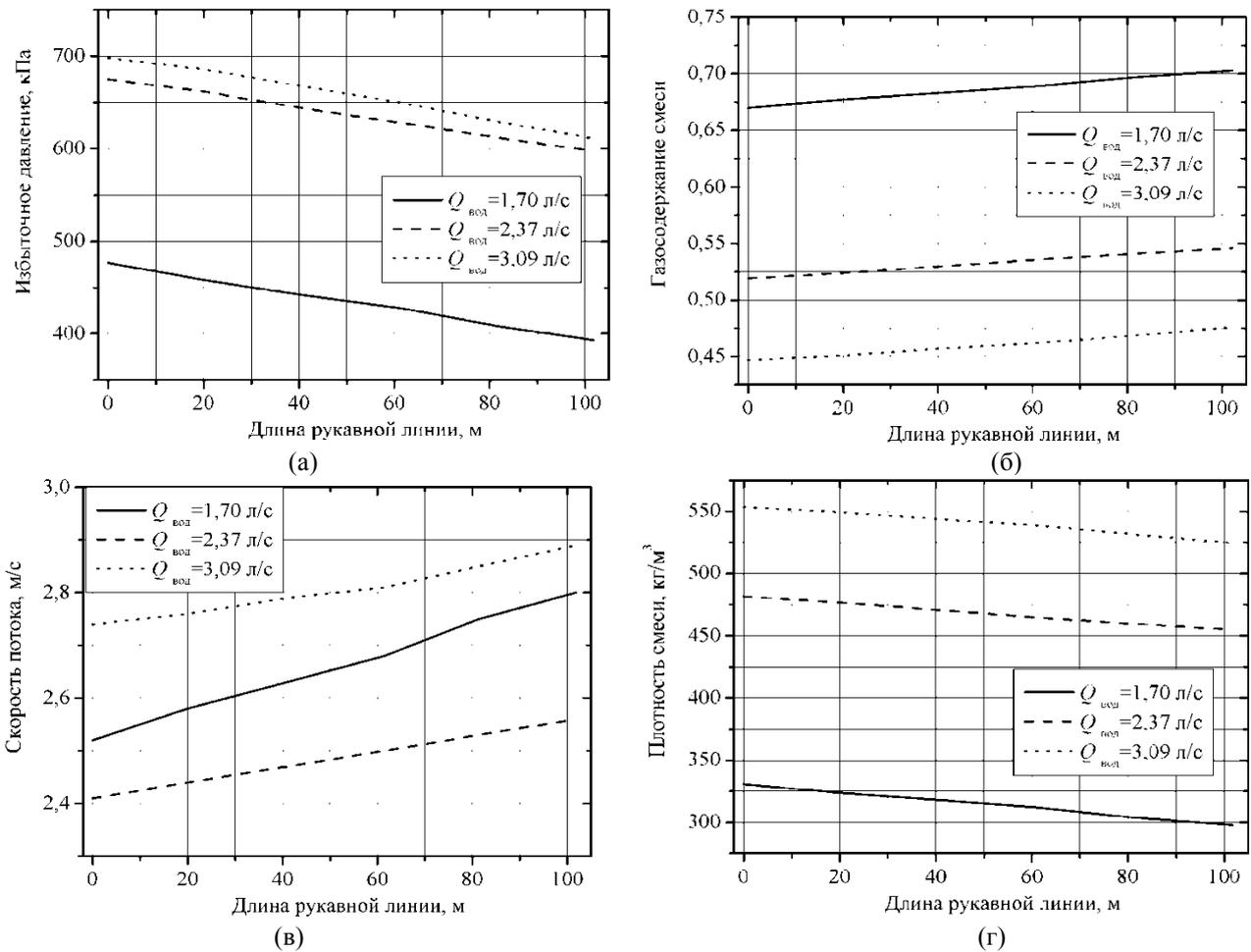


Рисунок 5 – Изменение давления (а), газосодержания (б), скорости (в) и плотности (г) по длине рукавной линии с внутренним диаметром 51 мм при использовании насадка с диаметром spryska 13 мм

Заключение. Движение компрессионной пены по рукавной линии сопровождается падением абсолютного давления (сумма атмосферного и избыточного давлений), что приводит к расширению воздуха, увеличению газосодержания, уменьшению плотности газожидкостной смеси и росту скорости потока по длине рукавной линии. Стоит отметить, что разгон потока при движении по рукавной линии и дальнейшее увеличение скорости при прохождении по ручному пожарному стволу обеспечивают дальность пенной струи не менее чем при подаче струи воды.

Удельные потери давления при движении компрессионной пены в рукавной линии с внутренним диаметром 38 мм оказались выше, чем в рукавной линии с внутренним диаметром 51 мм при одинаковом расходе воды.

Результаты экспериментальных исследований будут использованы при разработке методики расчета потерь давления в насосно-рукавной системе ПССВ при подаче компрессионной пены, что в свою очередь позволит определить тактико-технические возможности ПССВ и сформулировать рекомендации по их эффективному использованию.

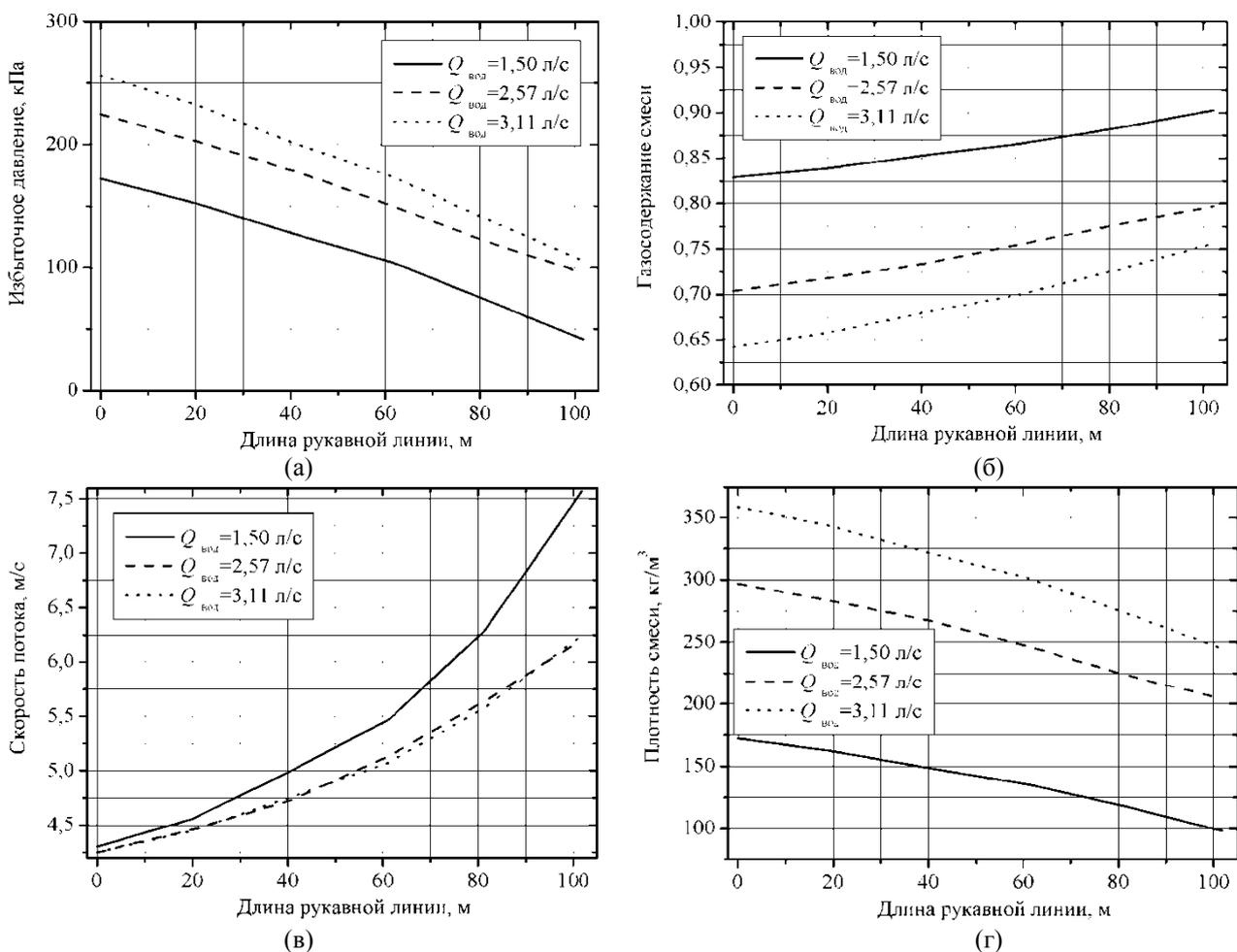
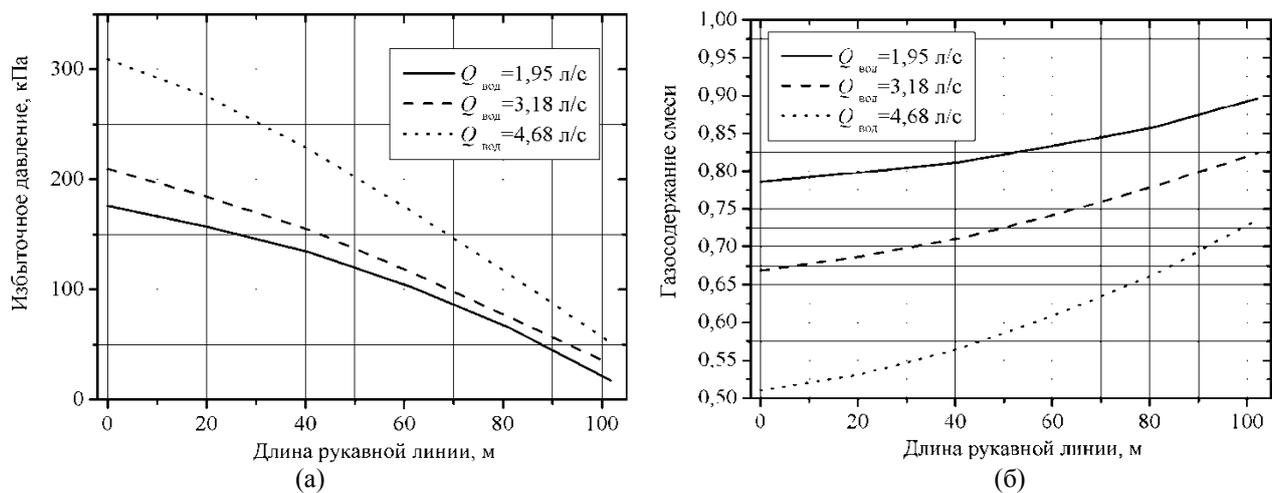


Рисунок 6 – Изменение давления (а), газосодержания (б), скорости (в) и плотности (г) по длине рукавной линии с внутренним диаметром 51 мм при использовании насадка с диаметром spryska 23 мм



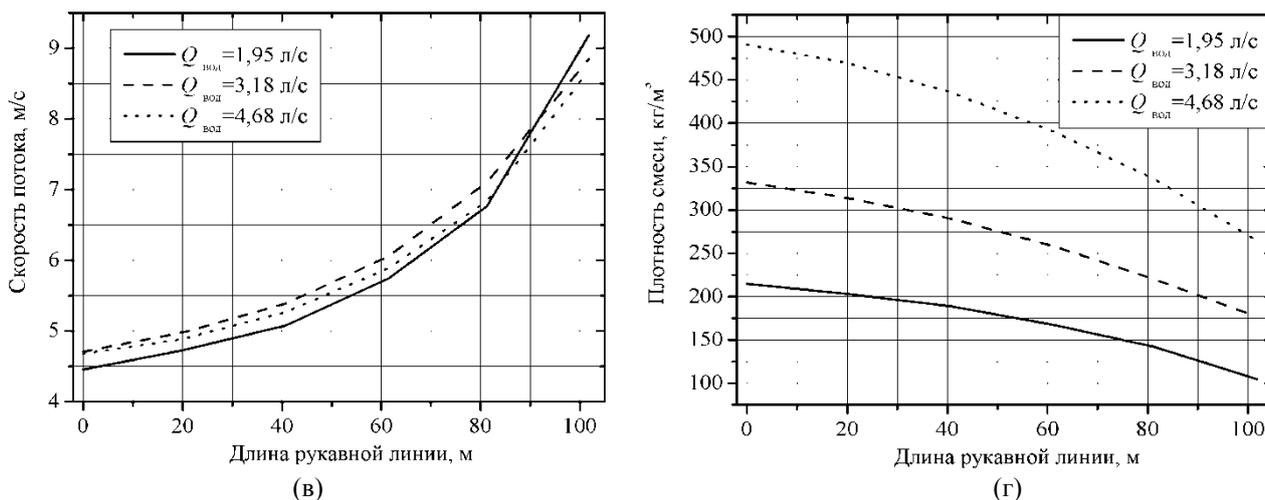


Рисунок 7 – Изменение давления (а), газосодержания (б), скорости (в) и плотности (г) по длине рукавной линии с внутренним диаметром 51 мм при использовании насадка с диаметром spryska 38 мм

ЛИТЕРАТУРА

1. Баратов, А.Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд.: в 2 книгах; кн. 1 / А.Н. Баратов [и др.]. – М.: Химия, 1990. – 496 с.
2. Навроцкий, О.Д. Исследование параметров пены, подаваемой с помощью пеногенерирующих систем со сжатым воздухом / О.Д. Навроцкий [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация – 2011. – № 2 (30). – С. 125–132.
3. Навроцкий, О.Д. Пеногенерирующие системы со сжатым воздухом – средство пенного пожаротушения нового поколения / О.Д. Навроцкий [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь – 2012. – № 1 (15). – С. 22–31.
4. Taylor, R.G. Technical Report 98: Compressed Air Foam Systems in Limited Staffing Conditions / R.G. Taylor – Morristown Fire Bureau – Morristown, New Jersey – 1998. – p. 75-112.
5. Бурдин, А.М. Установки пожаротушения с использованием компрессионной пены. Технологические особенности и преимущества / Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXVII Междунар. науч.-практ. Конф., посвященной 25-летию МЧС России. В 3 ч. Ч. 2. – М.: ВНИИПО, 2015. – С. 274-286.
6. Махахей, П.С. Возможность использования пеногенерирующих систем со сжатым воздухом для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности и высотных зданиях / П.С. Махахей [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: Сборник тезисов докладов VI междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июня. 2011 г.: в 2 т. / М-во чрезв. ситуаций Респ. Беларусь; редкол.: А.Ю. Лупей [и др.] – Минск, 2011. – Т. 2 – С. 45–48.
7. Record height with sky CAFS. [Electronic resource]. // Rosenbauer. – Mode of access: <http://rosenbauer.t3.world-direct.at/en/landing-pages-newsletter/2010-08-newsletter-rbi/record-height-with-sky-cafs>. – Date of access: 05.01.2015.
8. Малашенко, С.М. Устройство врезки в продуктопровод для подачи воздушно-механической огнетушащей пены в горящий резервуар / С.М. Малашенко // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2 (32). – С. 148–156.
9. Пармон, В.В. Описание экспериментальной установки для исследования движения пены в горизонтальном цилиндрическом канале / В.В. Пармон [и др.] // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2015. – № 1(21). – С. 47–53.
10. Грачулин, А.В. Численное моделирование движения пены по горизонтальному цилиндрическому каналу / А.В. Грачулин, А.Н. Камлюк // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов IX международной научно-практической конференции молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов): В 2-х ч. Ч.1. – Минск: КИИ, 2015. – С. 98–99.
11. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения: ГОСТ 8.207–76. – Введ. 01.01.1977. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 9 с.
12. Гриценко, А.И. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах / А.И. Гриценко, О.В. Клапчук, Ю.А. Харченко. – М.: «Недра», 1994. – 238 с., ил.