

УДК 614.843.8

## О ВЛИЯНИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ГАЗОНАСЫЩЕНИЯ ПЕНООБРАЗУЮЩЕГО РАСТВОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕНЫ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ В АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Качанов И.В.\*, д.т.н., профессор, Кулебякин В.В.\*, к.т.н., доцент,  
Павлюков С.Ю.\*\*

\*Белорусский национальный технический университет  
\*\*Командно-инженерный институт МЧС

e-mail: \*hidrokaf@bntu.by, \*\*asb@kii.gov.by

*Приведены результаты экспериментальных исследований оросителя с предварительной аэрацией огнетушащего вещества при различных режимах газонасыщения. Представлена испытательная установка, ее характеристики, условия проведения экспериментов. По результатам получены зависимости и дано заключение и подготовлены изменения в конструкторскую документацию.*

*The article contains a results of the pilot sample test sprinkler with pre-aeration of fire extinguishing agent at various modes of gas saturation. Description of device the test stand, its characteristics and test conditions. According to the results of tests given conclusion and made changes in the design documentation.*

(Поступила в редакцию 20 июля 2015 г.)

**Введение.** Автоматические установки пожаротушения предназначены для обнаружения и локализации пожара на ранней стадии, т. е. на той стадии, когда удельный тепловой поток невелик. Известно, что при незначительном тепловом потоке скорость разрушения пены прямо пропорциональна размеру пузырьков в пене, а при большой – не зависит от их размера [1]. Принимая во внимание то обстоятельство, что скорость разрушения пены зависит от плотности теплового потока, можно утверждать, что огнетушащая эффективность пены при неразвившихся пожарах (пожарах с тепловым потоком малой плотности), будет напрямую зависеть от кратности и дисперсности пены. Под кратностью понимается отношение объема пены к объему раствора, из которого она получена. Другими словами, кратность показывает, сколько газа содержится в пене, полученной из определенного объема жидкости. Чем больше кратность, тем легче пена и тем больше заключено в ней газа. Пены бывают низкой (менее 10), средней (10-100) и высокой (более 100) кратности. Кучер В.М. в работе [2] утверждает, что пены низкой кратности обладают большей проникающей способностью, лучшей растекаемостью по поверхности, эффективнее охлаждают горящие поверхности. Для получения пены в автоматических установках пожаротушения, как правило, применяются оросители универсальные. При работе оросителей во время пожара водный раствор пенообразователя, проходя через выходное отверстие оросителя, формируется в коническую струю и подается на специальную перфорированную розетку, которая реализует механизм дезинтеграции потока пенообразователя и его вспенивание. Принцип работы розеточных пенных оросителей заключается в эжекции воздуха за счет скорости струи пенообразователя. Данный механизм образования пены не позволяет получить более высокий (порядка 10) и гарантированный показатель кратности пены, что существенно снижает эффективность пожаротушения.

Ороситель с предварительной аэрацией огнетушащего вещества, конструкция которого предложена в [3], отличается эжектором, выполненным в виде трубы Вентури с отверстиями для газонасыщения, расположенными в узком сечении. Приведенные в [4] результаты экспериментальных исследований данного типа оросителя показывают удовлетворительное соответствие с теоретическими данными по перепаду давления в нем и подтверждают заявленное в [3] влияние аэрации пенообразующего раствора на кратность и устойчивость пены. Вместе с тем, для практического использования представляется как актуальным, так и необходимым определение объема воздуха (иными словами – количества и размеров отверстий в узком сечении эжектора оросителя) для газонасыщения пенообразующего раствора с целью оптимизации процесса генерации пены.

**Методика расчета диаметра отверстия для газонасыщения пены в оросителе с предварительной аэрацией огнетушащего вещества.** В работах [5, 6] авторами предложен расчет оросителя с предварительной аэрацией огнетушащего вещества. Расчет элементов эжектора оросителя проводится по ходу движения жидкости. Основными элементами эжектора являются конфузор, узкая часть (сжимаемое сечение) и диффузор. Одним из этапов является расчет узкого сечения в части обеспечения необходимой кратности пены. Расход (приток) воздуха для обеспечения необходимой кратности пены будет равен:

$$Q_{\text{воз.}} = Q(K - 1), \quad (1)$$

где  $Q$  – расход огнетушащего вещества;  
 $K$  – кратность пены.

Рассматривая приток воздуха, как истечение через малое отверстие в тонкой стенке можно записать известную формулу [7]:

$$Q_{\text{воз.}} = \mu S_{\text{воз.}} \sqrt{\frac{2\Delta p_{\text{воз.}}}{\rho_{\text{воз.}}}}, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода малого отверстия,  $\mu = 0,62$  [7];

$\Delta p_{\text{воз.}}$  – перепад между атмосферным давлением вне и пониженным давлением в узком сечении эжектора;

$\rho_{\text{воз.}}$  – плотность воздуха при нормальных условиях (для системы пожаротушения, которая находится в здании,  $\rho_{\text{воз.}}$  можно принять равной  $1,29 \text{ кг/м}^3$ );

$S_{\text{воз.}}$  – суммарная площадь отверстий для всасывания (подачи) воздуха с целью для образования пены заданной кратности,

$$S_{\text{воз.}} = \frac{\pi d_{\text{воз.}}^2}{4}, \quad (3)$$

где  $d_{\text{воз.}}$  – суммарный диаметр отверстия для подачи воздуха.

Диаметр отверстия для подачи воздуха, учитывая уравнения (2), (3) будет равен:

$$d_{\text{воз.}} = 2 \sqrt{\frac{Q_{\text{воз.}}}{\pi \mu} \sqrt{\frac{\rho_{\text{воз.}}}{2\Delta p_{\text{воз.}}}}}, \quad (4)$$

или, учитывая уравнение (1),

$$d_{\text{воз.}} = 2 \sqrt{\frac{Q(K - 1)}{\pi \mu} \sqrt{\frac{\rho_{\text{воз.}}}{2\Delta p_{\text{воз.}}}}}. \quad (5)$$

**Описание экспериментальной установки.** Для подготовки практических рекомендаций по выбору количества и размеров отверстий, а также согласования предложенной расчетной модели с опытом, в данной работе были проведены натурные испытания различных конструкций разработанного нами оросителя с предварительной аэрацией огнетушащего вещества. Испытания проводились на лабораторной установке, основными элементами которой являлись: ороситель с предварительной аэрацией, включенный в гидравлическую сеть (рис. 1), подключенный между входом и выходом оросителя преобразователь разности давлений «Сапфир-22ДД» (модель 2440, рис. 2); блок питания 22П-36 к нему и комбинированный цифровой прибор Щ4313 для измерения напряжения на преобразователе давления (рис. 3); установка для измерения кратности и устойчивости пены, электронные весы (рис. 4).

Для создания напорного течения в оросителе использованы центробежный насос, запорно-регулирующая арматура (клапан КЗУ-100) и система трубопроводов. На выходном прямолинейном участке трубопровода крепился опытный образец разработанного нами оросителя с предварительной аэрацией пенообразующего раствора. В непосредственной близости от него был установлен дифференциальный измеритель перепада давления «Сапфир-22ДД» с верхним пределом измерений  $0,063 \text{ МПа}$ , соединительные трубки от которого подключались к входу и выходу оросителя. Трубки от места отбора давления к преобразо-

вателю прокладывались по кратчайшему расстоянию с односторонним уклоном вниз к преобразователю. На выходе преобразователя было подключено нагрузочное сопротивление  $R_n$  величиной 1 кОм. Для уменьшения уровня пульсаций выходного сигнала параллельно сопротивлению нагрузки подключался конденсатор  $C_n$ , обеспечивающий величину постоянной времени измерений около 5 секунд.



Рисунок 1 – Фотография лабораторной установки для проведения исследований



Рисунок 2 – Фотография преобразователя разности давлений Сапфир-22ДД (2440)

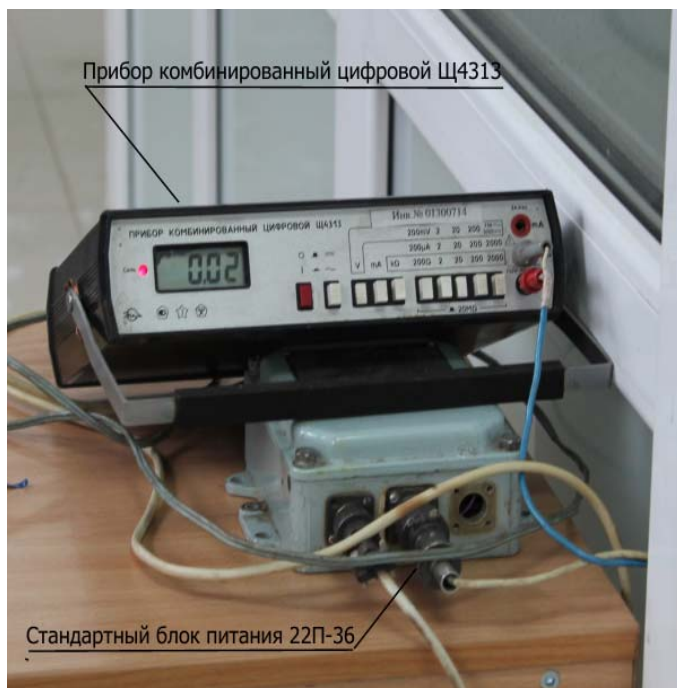


Рисунок 3 – Фотография прибора комбинированного цифрового Щ4313 и стандартного блока питания 22П-36



Рисунок 4 – Фотография установки для измерения кратности и устойчивости пены

Для создания напорного течения в оросителе использованы центробежный насос, запорно-регулирующая арматура (клапан КЗУ-100) и система трубопроводов. На выходном прямолинейном участке трубопровода крепился опытный образец разработанного нами оросителя с предварительной аэрацией пенообразующего раствора. В непосредственной близости от него был установлен дифференциальный измеритель перепада давления «Сапфир-22ДД» с верхним пределом измерений 0,063 МПа, соединительные трубки от которого подключались к входу и выходу оросителя. Трубки от места отбора давления к преобразователю прокладывались по кратчайшему расстоянию с односторонним уклоном вниз к

преобразователю. На выходе преобразователя было подключено нагрузочное сопротивление  $R_n$  величиной 1 кОм. Для уменьшения уровня пульсаций выходного сигнала параллельно сопротивлению нагрузки подключался конденсатор  $C_n$ , обеспечивающий величину постоянной времени измерений около 5 секунд.

Схема преобразователя «Сапфир-22ДД», приведенная на рисунке 5, включает тензопреобразователь мембранно-рычажного типа 4, размещенный внутри основания 9 в замкнутой полости 11, заполненной кремнийорганической жидкостью, и отделенной от измеряемой среды металлическими гофрированными мембранами 8. Мембраны 8 приварены по наружному контуру к основанию 9 и соединены между собой центральным штоком 6, который связан с концом рычага тензопреобразователя 4 с помощью тяги 5. Фланцы 10 уплотнены прокладками 3. Воздействие измеряемой разности давлений (большее давление подается в камеру 7, меньшее – в камеру 12) вызывает прогиб мембран 8, изгиб тензопреобразователя 4 и изменение сопротивления тензорезисторов. Электрический сигнал от тензопреобразователя передается из измерительного блока в усилительное устройство по проводам через гермовывод 2. Выходной сигнал с нагрузочного сопротивления в опытах измеряется с помощью цифрового милливольтметра Щ 4313.

Чувствительность прибора соответствовала условиям гидравлических испытаний, т. е. диапазон измерений, в наименьшей величине составлял около 16 % от оптимального.

Соединительные трубки от места отбора давления к преобразователю прокладывались по кратчайшему расстоянию с односторонним уклоном вниз к преобразователю. На выходе преобразователя установлено нагрузочное сопротивление  $R_n$  величиной 1 кОм. Для уменьшения уровня пульсаций выходного сигнала параллельно сопротивлению нагрузки подключался конденсатор  $C_n$ , обеспечивающий величину постоянной времени измерений около 5 секунд.

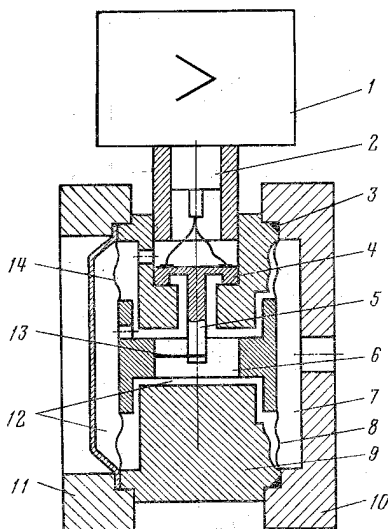


Рисунок 5 – Схема преобразователя разности давлений «Сапфир-22ДД»

Измерительный блок выдерживает без разрушения воздействие односторонней перегрузки рабочим избыточным давлением. Это обеспечивается тем, что при такой перегрузке одна из мембран 8 ложится на профилированную поверхность основания 9.

Процедура тарировки преобразователя (при изменении диапазона измерений) заключается в подаче на входы соединительных линий, воспринимающих давление, варьируемого гидростатического напора, величина разности которого контролируется по подключенным к ним пьезометрам. Калибровочная зависимость, как правило, имеет четко выраженный линейный вид с возрастающей характеристикой, при этом характеристика прибора весьма стабильна, о чем свидетельствует практически полное совпадение результатов тарировки до и после измерений. Уравнение регрессии 1-го порядка, аппроксимирующее результаты калибровки со степенью достоверности  $r = 0,999$ , записывается в виде линейной зависимости:

$$H = AE + B, \quad (6)$$

где  $H$  – разность напоров в измерительных камерах преобразователя (мм вод. ст.);

$E$  – величина выходного сигнала преобразователя (мВ);

$A$  и  $B$  – эмпирические тарировочные коэффициенты.

Время истечения фиксируется секундомером с точностью до 0,01 с. Давление, создаваемое на выходе центробежного насоса контролировалось манометром и составляло в процессе испытаний величину около 0,25 МПа. Включение и выключение насоса имитировало нестационарный режим работы и позволяло сделать предварительные выводы о герметичности и прочности образцов оросителей.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** Выполнены измерения перепада давления в диффузоре эжектора оросителя. Особый интерес представляло сравнение распределений давления в случае открытых и закрытых отверстий для предварительной аэрации, а также – сравнение характеристик двух типов оросителей, в частности, сопоставление их эжектирующей способности.

Перед началом работ проводилась контрольная тарировка преобразователя «Сапфир-22ДД» с использованием жидкостных пьезометров. Результат тарировки представлен на рисунке 6. Затем подсоединялись трубки к соответствующим сечениям образца оросителя и проводилась их проливка с целью устранения воздушных пузырьков, которые могли исказить показания прибора. Результаты тарировки обрабатывались с использованием метода наименьших квадратов, по этим результатам определялись значения коэффициентов  $A$  и  $B$  (рис. 6).

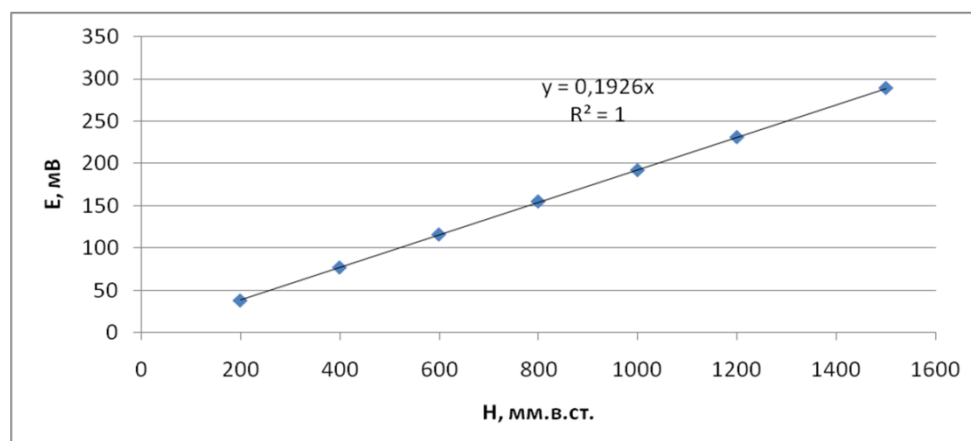


Рисунок 6 – Тарировка преобразователя измерительного Сапфир-22ДД (2440)

После указанных подготовительных операций выполнялась серия измерений перепада давлений в эжекторах оросителей при использовании различных пенообразователей («Синтек» и «ПО-6НСВ»). Замеры проводились при постоянном давлении на входе в ороситель  $P=2$ атм.

Приведенная выше программа измерений выполнялась в идентичных условиях при открытых и закрытых отверстиях для эжекции воздуха в поток огнетушащего вещества (водного раствора пенообразователя) в оросителе.

В ходе экспериментов определялась кратность получаемой пены. Кратность пены определяли на установке, представленной на рисунке 4. После установившегося давления перед оросителем пеной заполняли мерную емкость. Затем на весах определяли ее массу.

Кратность воздушно-механической пены  $K_{\Pi}$  определяли как отношение объема мерной емкости к массе пены в ее объеме с учетом плотности раствора пенообразователя по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{V_{\text{емк.}}}{m_2 - m_1} \cdot \rho_{\Pi}, \quad (7)$$

где  $V_{\text{емк.}}$  – объем мерной емкости,  $\text{м}^3$ ;

$m_2$  – масса мерной емкости, заполненной пеной, кг;

$m_1$  – масса мерной емкости, кг;

$\rho_{п}$  – плотность раствора пенообразователя, кг/м<sup>3</sup> (принята равной 1000 кг/м<sup>3</sup>).

Измерения количества эжектируемого воздуха показали, что кратность пены в оросителе с предварительной аэрацией выше даже при закрытых отверстиях. Можно предположить, что увеличение кратности объясняется эффектом трубы Вентури. Поток проходит через узкое сечение с возрастанием скорости и падением давления. Возрастание средней скорости приводит к падению давления в области сужения струи. Окружающий воздух при уменьшении давления будет эжектироваться в струю жидкости через отверстия в узком сечении, что и требуется для конструкций оросителей с предварительной аэрацией огнетушащего вещества.

После открытия 1-го отверстия происходит резкое увеличение кратности пены, а после открытия 3-го (для  $D = 9,6$  мм) и 4-го (для  $D = 7,8$  мм) отверстий для газонасыщения кратность пены начинает уменьшаться (рис. 7, 8). Однако, кратность пены при всех открытых отверстиях на всех образцах выше, чем при закрытых. Таким образом, подтверждаются результаты, полученные в [8], согласно которым измерения количества эжектируемого воздуха показали, что существует диапазон скоростей течения, при которых аэрация практически отсутствует из-за небольшой величины создаваемого вакуума. Затем, начиная примерно с расходов около 0,35 л/с (для данной конструкции оросителя), начинается резкое увеличение газосодержания, которое постепенно стабилизируется, и дальнейшее увеличение скорости почти не влияет на его величину.

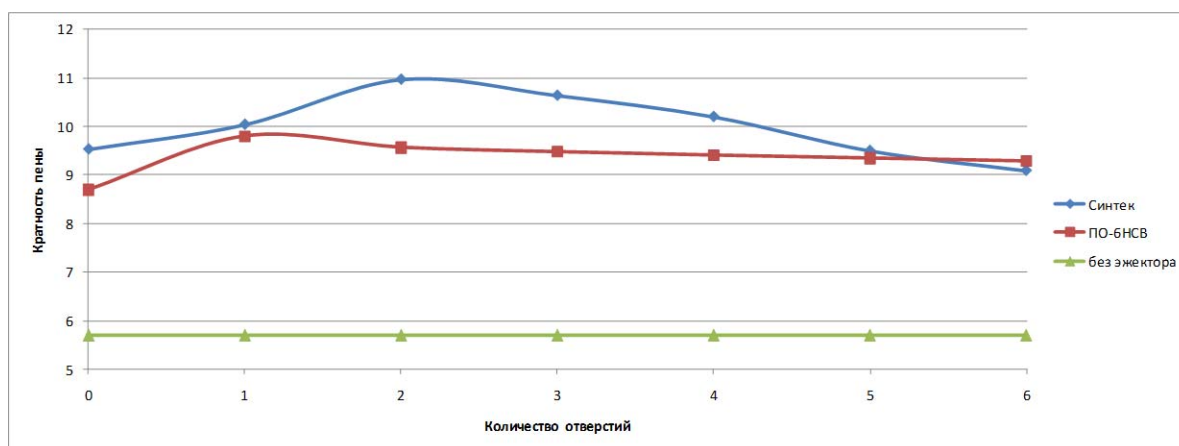


Рисунок 7 – Зависимость кратности пены от количества отверстий для газонасыщения в оросителе с диаметром узкого сечения эжектора  $D = 9,6$  мм

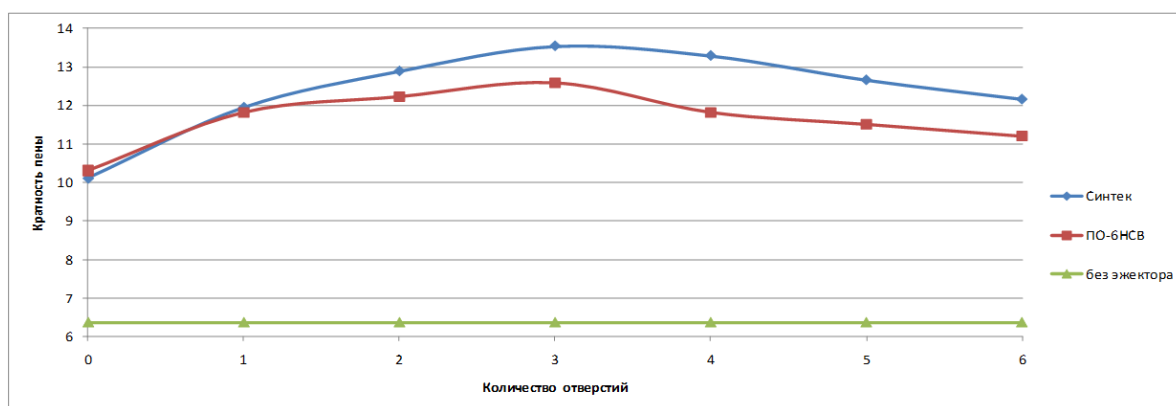


Рисунок 8 – Зависимость кратности пены от количества отверстий для газонасыщения в оросителе с диаметром узкого сечения эжектора  $D = 7,8$  мм

Кратность пены измерялась при использовании пенообразователей «Синтек» и «ПО-6НСВ» на двух образцах оросителя с диаметрами узкого сечения в эжекторе  $D = 9,6$  мм и



$D = 7,8$  мм. Пена, получаемая оросителями, подавалась в установку для определения кратности и устойчивости пены в лабораторных условиях (дата калибровки 21.03.2015, свид. № 60). Замеры проводились при вначале полностью закрытых отверстиях для эжекции, затем открывалось по одному отверстию.

Количество отверстий – 6, диаметр – 1,4 мм для образца оросителя с диаметром узкого сечения эжектора  $D = 7,8$  мм и диаметр – 1,75 для  $D = 9,6$  мм. За устойчивость пены принималась ее способность к сохранению первоначальных свойств. Сущность метода определения устойчивости пены заключалась в установлении времени выделения 50 % жидкой фазы. Результаты измерений представлены на рисунках 9 и 10.

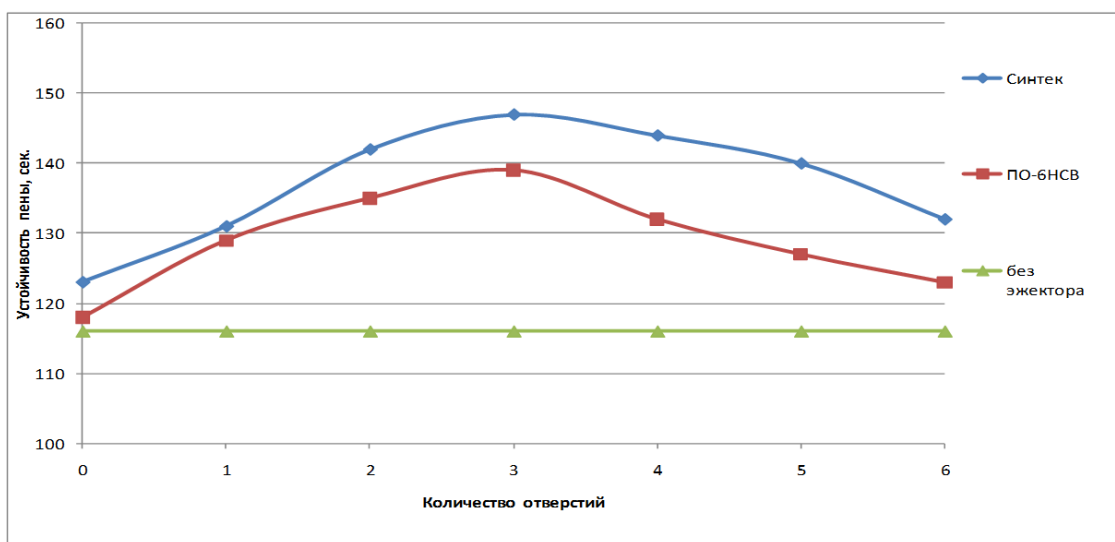


Рисунок 9 – Зависимость устойчивости пены от количества отверстий для газонасыщения в оросителе с диаметром узкого сечения эжектора  $D = 7,8$  мм

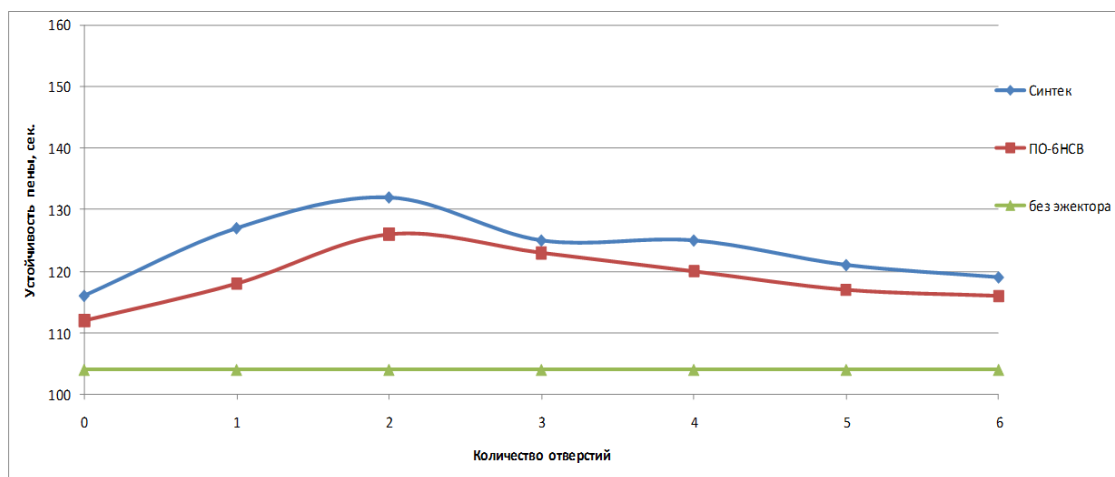


Рисунок 10 – Зависимость устойчивости пены от количества отверстий для газонасыщения в оросителе с диаметром узкого сечения эжектора  $D = 7,8$  мм

Одновременно с измерением кратности и устойчивости получаемой пены проводились измерения расхода огнетушащего вещества при постепенном открытии отверстий для эжекции воздуха. Расход раствора пенообразователя (измерялась масса жидкой фазы) также изменяется в зависимости от объема эжектируемого воздуха. Для оросителя с диаметром узкого сечения эжектора  $D = 7,8$  мм оптимальным является процесс эжекции воздуха через 3 отверстия (рис.11), а для оросителя с диаметром узкого сечения эжектора  $D = 9,6$  мм через 2 (рис.12).

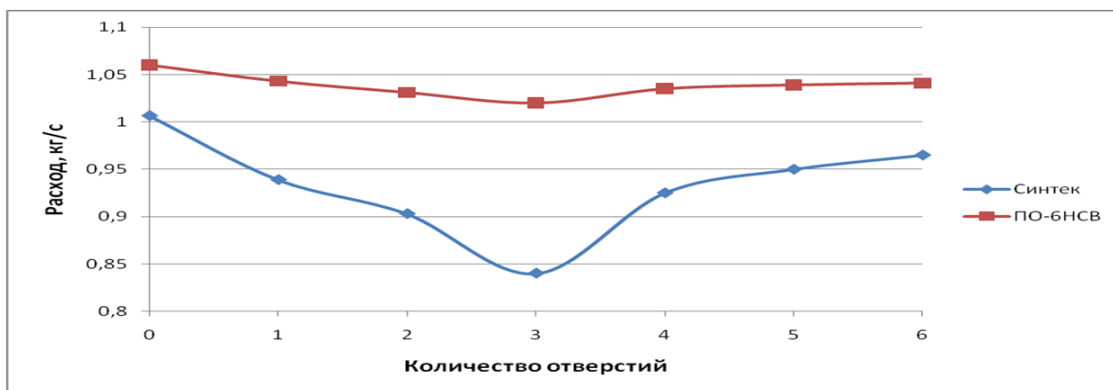


Рисунок 11 – Зависимость расхода огнетушащего вещества от количества отверстий для газонасыщения в оросителе с диаметром узкого сечения эжектора  $D = 7,8$  мм

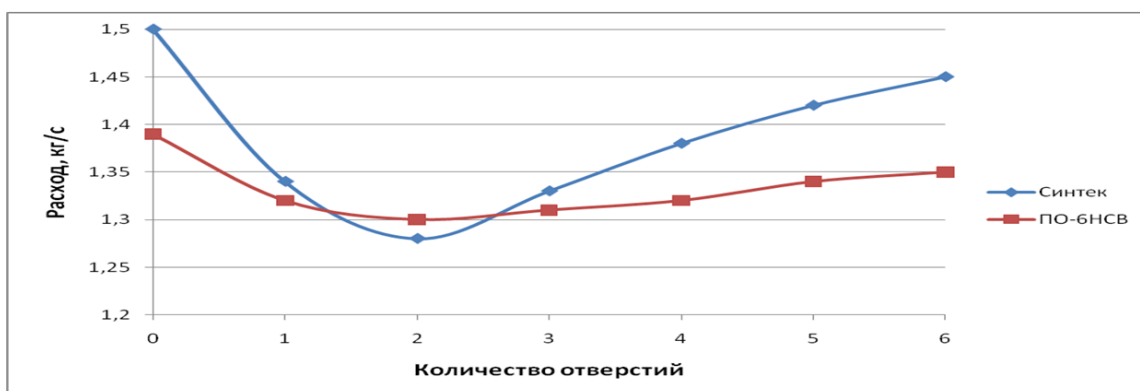


Рисунок 12 – Зависимость расхода огнетушащего вещества от количества отверстий для газонасыщения в оросителе с диаметром узкого сечения эжектора  $D = 9,6$  мм

Перепад давления при испытаниях определялся при помощи преобразователя измерительного «Сапфир-22ДД (модель 2440)» (рис.13, 14). По этой величине можно судить о гидравлическом сопротивлении данной конструкции оросителя. Как следует из результатов, представленных на рисунках 13 и 14, гидравлическое сопротивление оросителя с более узким проходным сечением изначально выше, чем у оросителя с большим диаметром, как и следовало ожидать. Тенденция возрастания перепада давления с увеличением количества открываемых отверстий объясняется перераспределением давления по длине оросителей (в связи с изменением давления в области сужения), практически не зависит от типа раствора пенообразователя и изменяет темп своего нарастания при увеличении количества открытых отверстий.

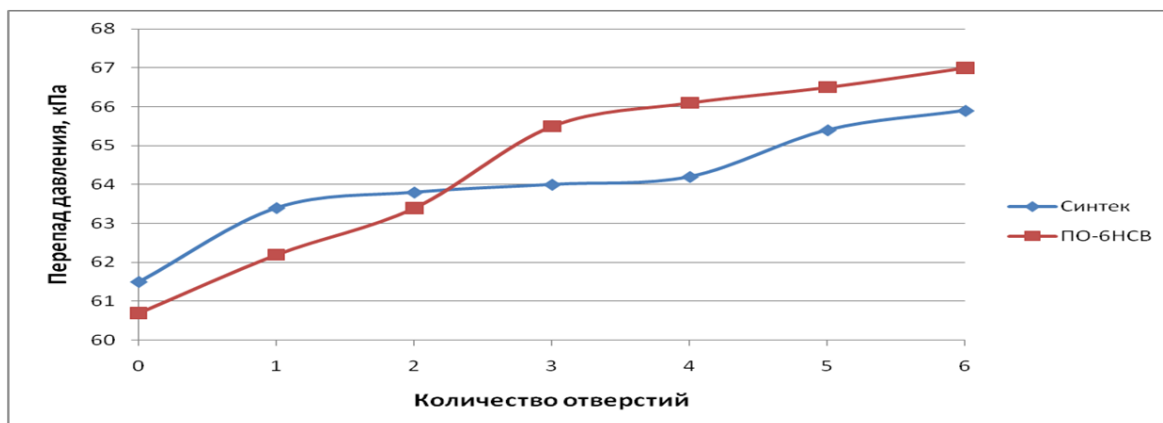
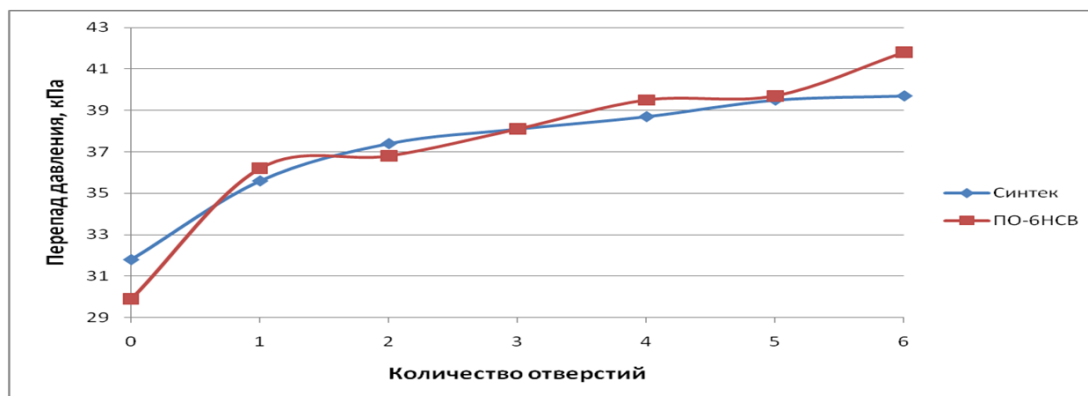


Рисунок 13 – Зависимость перепада давления в эжекторе от количества отверстий для газонасыщения в оросителе с диаметром узкого сечения эжектора  $D = 7,8$  мм





**Рисунок 14** – Зависимость перепада давления в эжекторе от количества отверстий для газонасыщения в оросителе с диаметром узкого сечения эжектора  $D = 9,6$  мм

**Заключение.** Проведенные экспериментальные исследования показали, что степень предварительного газонасыщения раствора пенообразователя существенно (качественно и количественно) влияет на кратность и устойчивость генерируемой оросителем пены. Предложенная в [5, 6] методика расчета оросителей с предварительной аэрацией огнетушащего вещества в целом удовлетворительно соответствует экспериментальным данным, но требуется уточнение эмпирических констант, используемых в расчетах.

При увеличении площади отверстий для газонасыщения кратность и устойчивость получаемой пены увеличивается до определенного значения, а затем снижается. Таким образом, для каждого типоразмера оросителя и определенного вида пенообразователей существует оптимальное соотношение между скоростью движения потока и размерами отверстий для эжекции газа, при котором кратность получаемой пены с их использованием максимальна (при минимальности расхода раствора пенообразователя). Это соотношение следует определять экспериментальным путем на этапе разработки конструкции оросителей с использованием соответствующих растворов пенообразователей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Безродный, И.Ф. Тушение нефти и нефтепродуктов / И.Ф. Безродный, А.Н. Гилетич, В.А. Меркулов, В.П. Молчанов, А.Н. Швырков – М. ВНИИПО, 1996 – С. 53–65.
2. Кучер, В.М., Меркулов, В.А., Жуков, В.В. О стойкости воздушно-механической пены на поверхности углеводородных жидкостей // Горение и проблемы тушения пожаров: Тезисы докл. V Всесоюзной науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО, 1977. – С. 156-158.
3. Ороситель с предварительной аэрацией огнетушащего раствора: пат. 10277 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) А 62С 31/00. / И.В. Карпенчук, И.И. Полевода, И.В. Качанов, С.Ю. Павлюков, Я.С. Волчек, С.М. Палубец; заявитель КИИ МЧС. – № и 20140830; заявл. 10.01.14; опубл. 02.06.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 5. – С. 175.
4. Павлюков, С.Ю. Ороситель с предварительной аэрацией огнетушащего вещества в автоматических установках пенного пожаротушения / С.Ю. Павлюков // Вестник КИИ МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 2(18). – С. 81-90.
5. Карпенчук, И.В. Методика расчета гидродинамических параметров оросителя с предварительной аэрацией огнетушащего вещества [текст]: отчет о НИР/ КИИ МЧС Республики Беларусь; рук. И.В. Карпенчук, исполн.: С.Ю. Павлюков [и др.]. – Мн., 2012. – 22 с. – ГР 20121161.
6. Pauliukou, S. / Calculation of sprinkler with gas saturation at automatic fire extinguishing foam systems / Ihar Kachanau, Ihar Karpenchuk, Siarhei Pauliukou, Liudmila Lyashenka // Scientific Journal of RTU, Safety of technogenic environment. – 2013. – 4. vol. – P. 18-23.
7. Ивашечкин, В.В. Механика жидкости и газа. Лабораторный практикум: учебное пособие / В.В. Ивашечкин [и др.]; под ред. И.В. Качанова – 4-е изд. перераб. и доп. – Мн.: БНТУ, 2006. – 66 с.
8. Проведение научно-технического поиска и разработка проекта экспериментального образца оросителя с предварительной аэрацией огнетушащего вещества, в рамках задания 2.2.24 «Обоснование оптимальных технических решений и разработка оросителей с предварительной аэрацией огнетушащего вещества для автоматических установок пенного пожаротушения»: Отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. И.В. Качанов; исполн.: Кулебякин В.В., Шаталов И.М. и др. – Мн., 2014. – 139 с. – Библиогр.: 40, № ГР 20122240.