

УДК 662.612:32

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СИЛАНА ПРИ ИСТЕЧЕНИИ В ВОЗДУХ

С.-Ю. Цзай¹, Х.-Л. Хун¹, С.-И. У¹, Ч.-В. Ку¹, Дж.-Р. Чэнь¹, П. А. Фомин²,
А. В. Фёдоров³

¹Первый национальный Гаосюнский научно-технологический университет, 824 Гаосюн, Тайвань
jrc@nkfust.edu.tw

²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, fomin@hydro.nsc.ru

³Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск
fedorov@itam.nsc.ru

Исследовалось влияние температуры силана и влажности окружающей среды на характер воспламенения. Измерена критическая скорость истечения, при которой воспламенение происходит с задержкой при различных температурах силана и влажности окружающего воздуха. Получено, что логарифм критической скорости истечения пропорционален обратной температуре силана. Установлено, что влага, содержащаяся в воздухе, оказывает сильное ингибирующее действие на самовоспламенение силана. Сделан вывод о том, что быстрому воспламенению силана способствуют его высокая температура и низкая влажность окружающей среды.

Ключевые слова: силан, истечение, струя, воспламенение, температура, влажность.

DOI 10.15372/FGV20170304

ВВЕДЕНИЕ

Силан является одним из наиболее широко используемых газов для получения кремния путем химического осаждения из паровой фазы в производстве жидкокристаллических дисплеев, в полупроводниковой и фотоэлектрической промышленности. Силан также известен как пирофорный газ, который обычно воспламеняется при контакте с воздухом. Тем не менее, истечение силана из баллона высокого давления, как известно, может привести к задержке воспламенения. При этом часто зажигание происходит, когда истечение силана прерывается, что приводит к сгоранию с характерным хлопком [1]. В частично замкнутом пространстве воспламенение может вызвать взрыв ско-

пившегося силана и причинить значительные повреждения [2].

В [3] установлена критическая скорость истечения силана из отверстия, при превышении которой газ не воспламеняется вплоть до отключения потока. В [4] обнаружено, что критическая скорость истечения при отложенном воспламенении (воспламенении с задержкой) силана сильно зависит от размера выходного отверстия. Задержка воспламенения объяснялась влиянием сдвиговой скорости, или скалярной скорости диссипации между струей силана и окружающим воздухом. Настоящая работа посвящена исследованию влияния температуры силана и влажности окружающей среды на воспламенение.

В работе [5] показано, что критическая скорость истечения силана при воспламенении с задержкой изменяется в зависимости от температуры. Однако убедительных результатов получено не было, возможно из-за ограниченного диапазона температуры ($-4 \div 8$ °C) и недостатков экспериментального оборудования. Поскольку воспламенение контролируется химической кинетикой, следует ожидать, что температура будет играть основную роль в процессе воспламенения, и проявляться это будет через критическую скорость истечения силана

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и технологии Тайваня (проект № NSC 102-2923-E-327-001-MY3), совместных исследовательских проектов Сибирского отделения РАН и Министерства науки и технологии Тайваня (проект № MOST 105-2923-E-327-001-MY3), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-01947-а) и Российского научного фонда (проект № 16-19-00010).

© Tsai H.-Y.¹, Hung H.-L.¹, Wu S.-Y.¹, Ku C.-W.¹,
Chen J.-R.¹, Фомин П. А., Фёдоров А. В., 2017.

¹Department of Safety, Health and Environmental Engineering, National Kaohsiung First University of Science & Technology, Yenchau, 824 Kaohsiung, Taiwan.

при воспламенении с задержкой.

Влияние влаги или водяного пара на воспламенение до сих пор вызывает полемику. В [6] сообщалось о том, что вода является сильным ингибитором реакции силан — кислород и верхний предел воспламенения по давлению сильно зависит от содержания паров воды в исходной смеси. Наличие воды может стабилизировать смесь и значительно понизить верхний предел воспламенения по давлению. В [7] при исследовании предела самовоспламенения обедненной по кислороду смеси силан — кислород обнаружено, что наличие дополнительного водяного пара не промотирует воспламенение при давлении окружающего воздуха и комнатной температуре. Результаты не содержат также и прямого указания на способность водяного пара подавлять воспламенение.

В [8] проведены квантово-химические расчеты для ряда элементарных реакций, имеющих отношение к низкотемпературному окислению силана. Расчеты были сделаны и для реакций основных промежуточных продуктов с атомами водорода и молекулами паров воды. Обнаружен целый ряд радикалов, легко вступающих в реакцию с водяным паром, который либо присутствует в воздухе, либо образуется в реакции горения. Однако, как водяной пар воздействует на воспламенение силана, в работе [8] не обсуждается.

В серии экспериментов [9] по самовоспламенению силана, разбавленного азотом до уровня ниже 3 %, обнаружено, что предельная скорость силана в цилиндрической трубке горелки, внутри которой возможно самовоспламенение, значительно возрастает в присутствии отложений продуктов сгорания силана на верхней кромке горелки, т. е. наличие отложений положительно влияет на самовоспламенение силана. Было высказано предположение, что этот эффект связан с наличием молекул воды, адсорбированных на отложениях. Проведенные дополнительные эксперименты с добавлением влаги в смесь силана и азота и в окружающий сухой воздух показали, что добавление влаги в силаноазотную смесь способствует ее самовоспламенению, в то время как добавление влаги в воздух не имеет четкого влияния на самопроизвольное воспламенение разбавленного силана. Позднее в [9, 10] был предложен механизм горения силана при низкой температуре, основанный на предположении, что следовые количества паров воды увеличивают вероятность

возникновения самовоспламенения при комнатной температуре.

В [11] экспериментально изучали кинетику воспламенения и кинетические механизмы соответствующих реакций в смесях силан/кислород/разбавители с использованием устройства быстрого сжатия. Получены профили давления во времени, а также зависимости молярной доли гидроксила (ОН) от времени. Установлено, что воспламенение проходит в два этапа, причем радикалы ОН появляются только в течение второго этапа. Моделирование результатов экспериментов проводилось по модифицированному механизму химической кинетики, предложенному в [10]. Модель предсказывала два пика радикала ОН, в то время как эксперимент показывал отсутствие радикала ОН во время первого предсказанного пика. Первый пик совпал с подъемом давления в эксперименте. Второй предсказанный пик в распределении радикала ОН совпал с экспериментально измеренным, но появлялся позже и его амплитуда была на 25 ÷ 50 % выше соответствующего экспериментального значения.

Таким образом, возможны три источника паров воды, которые могут влиять на воспламенение силана, а именно: примесь пара в источнике силана, наличие пара в продуктах сгорания силана, влажность окружающего воздуха. Как указано в [8], первый источник вызывает прямую реакцию водяного пара и силана. Однако трудно отличить влияние на воспламенение процессов, происходящих в продуктах реакции, от влияния паров непрореагировавшей воды. Анализ второго источника паров воды характеризуется теми же трудностями, что и первый источник, так как влага всегда присутствует в продуктах горения. Настоящая работа направлена на экспериментальное исследование воздействия влаги из окружающего воздуха на воспламенение чистого силана с целью выяснить роль влаги в реакции силана с окислителем. Проведено также исследование влияния температуры, чтобы получить представление о кинетике реакций в силановоздушной смеси.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

1.1. Контроль влажности в воздухе

В работе [10] сделано предположение, что следовые количества паров воды усиливают вероятность возникновения самовоспламенения

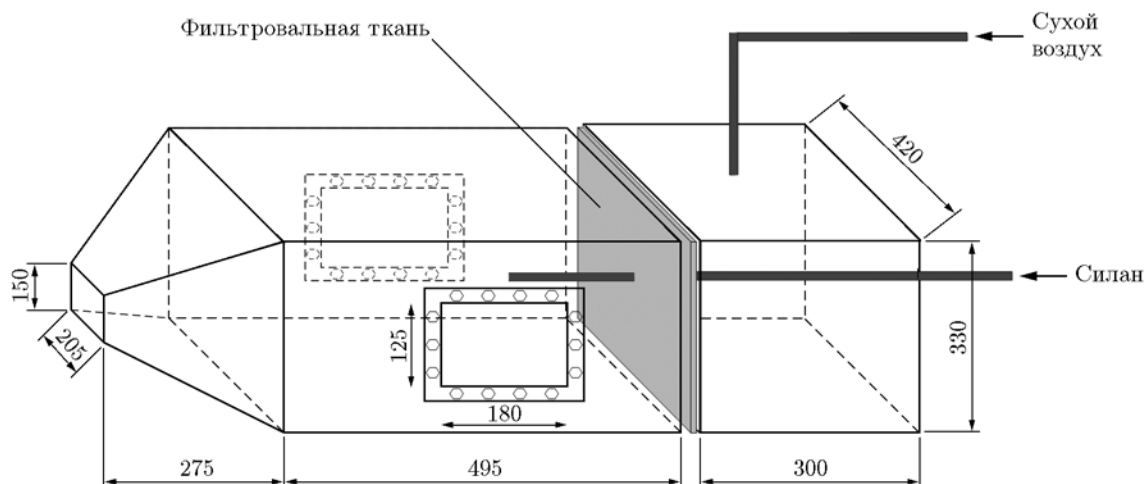


Рис. 1. Схема экспериментальной камеры низкой влажности (размеры приведены в миллиметрах)

при комнатной температуре. Для расчетов в [10] был использован кинетический механизм из [11] в предположении, что содержание влаги составляет ≈ 270 ppm. Таким образом, для понимания роли влаги желательно провести эксперименты по истечению силана, в которых влаги было бы намного меньше 270 ppm. Однако окружающий воздух содержит влагу, к тому же все сосуды или поверхности трубопровода могут ее адсорбировать [12]. Для достижения такого низкого уровня влаги в окружающем воздухе в качестве источника воздуха с низким содержанием влаги использовался воздух нулевого класса из цилиндра с точкой росы -110 °C (содержание влаги 0.002 ppm).

Была изготовлена камера из нержавеющей стали (рис. 1) шириной 420 мм и высотой 330 мм, состоящая из трех частей: первая секция длиной 300 мм, в которую воздух низкой влажности подается из верхней части; вторая секция длиной 495 мм, в центре которой находится трубка, по которой движется силан; третья секция длиной 275 мм, поперечное сечение которой уменьшается до размеров 205×150 мм. Фильтровальная ткань, разделяющая первые две секции, помогает равномерно распределить сухой воздух во второй секции. Сужение второй секции уменьшает проникновение наружного воздуха и помогает контролировать влажность в камере. Два смотровых окна во второй секции обеспечивают визуализацию воспламенения. После каждого испытания камеру демонтировали, очищали и высушивали перед следующим использованием.

Для обеспечения непрерывного тестирования были построены четыре одинаковые камеры.

Расход воздуха ограничивался 200 л/мин. Таким образом, скорость течения воздуха во второй секции камеры была меньше 0.03 м/с. Для устранения любой возможной конденсации влаги на стенке камеры сухой воздух нулевого класса вначале (перед подачей и промывкой камеры) проходил через нагревательную рубашку при температуре ≈ 50 °C. Влажность измеряли на выходе из камеры до тех пор, пока точка росы воздуха в камере не становилась меньше -50 °C, что соответствует концентрации влаги меньше 40 ppm. Во всех экспериментах с низким содержанием влаги температуру силана поддерживали на уровне 28 ± 2 °C, температуру воздуха в камере — также на уровне 28 ± 2 °C. Температуру окружающей среды поддерживали равной 28 ± 2 °C при относительной влажности 55 ± 10 %. Среднее содержание влаги в обычном атмосферном воздухе составляет около 23 000 ppm.

Для изменения влажности воздуха в камере до требуемого уровня часть сухого воздуха нулевого класса перед смешением с остальным сухим воздухом барботировали через воду внутри сосуда с нагревательной рубашкой, температуру которой контролировали. Содержание и температуру проходящего газа рассчитывали в предположении его насыщения парами воды. Влажность на выходе из камеры измеряли до тех пор, пока она не достигала желаемого значения.

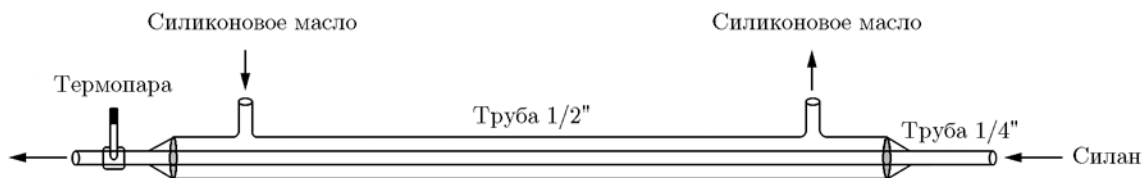


Рис. 2. Принципиальная схема трубки с кожухом для контроля температуры силана

1.2. Управление температурой при выходе силана

Опыты по истечению силана проводили на установке, аналогичной используемой в [4]. Она имела электрическое управление клапаном для отвода потока силана в окружающий воздух, как только устанавливался желаемый устойчивый поток силана. После переключения клапана поток газа проходил через теплообменник — горизонтальную трубку с рубашкой длиной 2 м, в которой силан нагревался или охлаждался до необходимой температуры. К концу трубки приваривалась термопара для измерения температуры силана перед выходным насадком (рис. 2). Тестовое измерение температуры азота при его прохождении через трубку свидетельствовало о возможности контролировать температуру газа с точностью ± 0.5 °С. Критическую скорость истечения при воспламенении с задержкой и быстрым воспламенением (будем называть его также мгновенным воспламенением, по аналогии с отложенным) определяли при температуре силана $0 \div 50$ °С. Во всех опытах использовали выходной патрубок Swagelok[®] с внутренним диаметром 4.32 или 2.03 мм. После каждого эксперимента его обязательно заменяли, чтобы предотвратить любое воздействие продуктов горения.

Для истечения в нормальный атмосферный воздух использовали плексигласовую кубическую емкость со сторонами 1 м со свободно установленными стенками и одной открытой стороной, направленной навстречу истечению. Это делается для того, чтобы защитить вытекающий силан от ветра и других возмущений. Выход трубы располагался на расстоянии 30 см от открытой стороны по центру куба. Нежесткое крепление плексигласовых стенок допускало дополнительную вентиляцию, которая позволяла сводить к минимуму избыточное давление, возникающее после взрыва. Установка для истечения силана и вентиляционный объем находились внутри откры-

той комнаты, что препятствовало помехам от солнечных лучей и дождя.

Использовался силан полупроводникового класса чистоты 99.9999 % в цилиндрическом баллоне компании «Air Products Sanfu Gas Co». До проведения эксперимента систему труб и сосудов продували под давлением азотом высокой чистоты (99.9999 %). Для регистрации воспламенения и ядра пламени использовали цветную видеокамеру со скоростью записи 8 000 кадр/с. Поскольку показатели преломления газообразного силана и окружающего воздуха значительно отличаются, для определения точного времени задержки между выходом силана и его воспламенением вели длительную запись стандартной цветной видеокамерой со скоростью 30 кадр/с, которая была направлена прямо на струю силана. Отложенная задержка воспламенения определялась как воспламенение, которое наступало через 0.5 с после начала истечения струи.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

2.1. Влияние влажности

В опытах с сухим, крайне низкой влажности (точка росы < -50 °С) окружающим воздухом применяли соединительные 1/4-дюймовые трубки с внутренним диаметром 4.32 мм. Несмотря на это, происходило быстрое воспламенение даже при максимальной скорости потока, допускаемой в регуляторе массового расхода. Поскольку потенциальная опасность значительно возрастает с увеличением скорости потока силана, было принято решение уменьшить размер выходного отверстия, используя соединительные 1/4-дюймовые трубки с внутренним диаметром 3.5, 3.0, 2.5 мм и 1/8-дюймовые трубки с внутренним диаметром 2.03 мм. На рис. 3 приведены данные по критической скорости истечения силана в окружающий воздух крайне низкой влажности

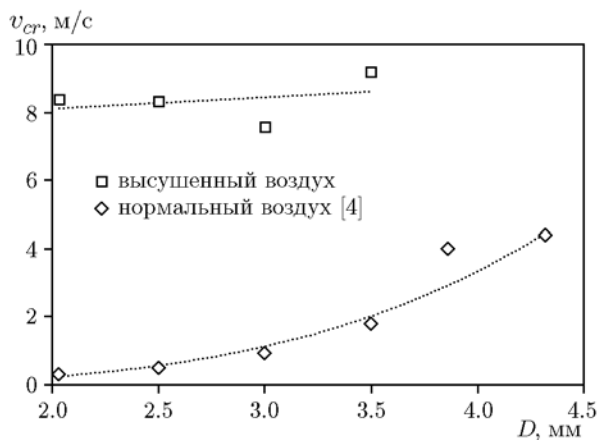


Рис. 3. Сравнение критических скоростей истечения силана в нормальный и высушенный (точка росы меньше -50 °C) окружающий воздух

для воспламенения с задержкой и для быстрого воспламенения в зависимости от размера клапана, а также приведены результаты [4] в случае истечения в нормальный влажный окружающий воздух. Видно, что влага, содержащаяся в нормальном атмосферном воздухе, играет ингибирующую роль в процессе воспламенения силана. Удаление влаги из воздуха приводит к значительно более высокой критической скорости во всех тестируемых случаях.

Для однородного струйного течения скорость деформации изменяется как отношение скорости струи к диаметру выходного отверстия: v/D . Таким образом, ожидается, что критическая скорость потока при воспламенении с задержкой будет изменяться линейно с изменением диаметра отверстия. Из рис. 4 видно, что критическая скорость деформации потока, определяемая как v_{cr}/D в испытаниях в воздухе с низким содержанием влаги, примерно постоянна для всех тестируемых размеров отверстия, а в испытаниях в условиях нормальной воздушной среды [4] она существенно зависит от размера отверстия. Для сухого воздуха с низкой влажностью критическая скорость деформации потока, требуемая для погашения воспламенения силана, выше, чем в случае обычного воздуха нормальной влажности. Разница между этими двумя вариантами вновь свидетельствует о том, что влага, содержащаяся в окружающем воздухе, играет существенную роль в ингибировании воспламенения силана. Без влаги подавление воспламенения вы-

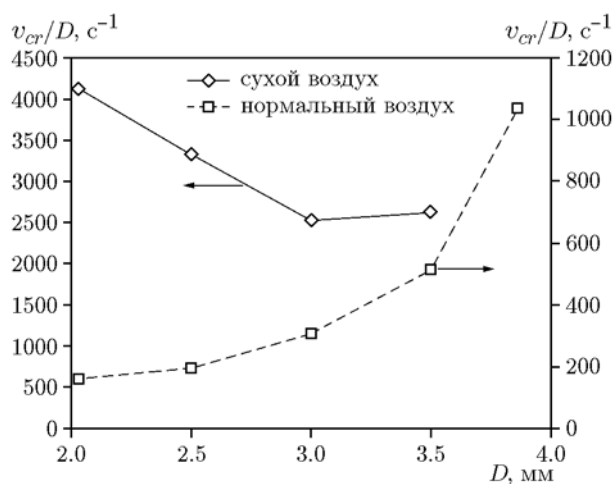


Рис. 4. Отношение критической скорости истечения силана в сухой и нормальный воздух к выходному диаметру в зависимости от размера выходного отверстия

звано чисто газодинамическим воздействием и, следовательно, должно быть одинаковым при различных диаметрах отверстий. При наличии влаги в реакции окисления силана в воздухе требуемый расход газа для замораживания процесса снижается и приводит к нелинейной связи между критической скоростью и диаметром отверстия.

На рис. 5 приведена зависимость критической скорости от содержания влаги при истечении из отверстий различных диаметров. Критическая скорость на выходе приблизи-

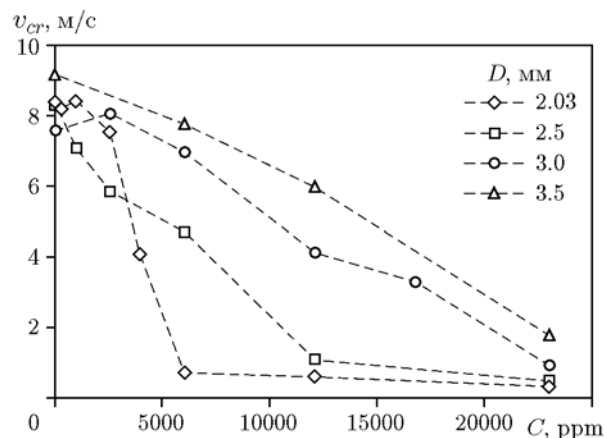


Рис. 5. Зависимость критической скорости истечения от содержания влаги в воздухе при различных размерах выходного отверстия

тельно обратно пропорциональна содержанию влаги в воздухе. Такая зависимость наблюдалась в случаях с выходными диаметрами 3.0 и 3.5 мм, а при диаметре 2.5 мм она имела место только при содержании влаги ниже 12 000 ppm. Для выпускного отверстия диаметром 2.03 мм обратно пропорциональная зависимость справедлива только в диапазоне влажности 1 000 ÷ 6 000 ppm. Выше и ниже этих значений критические скорости примерно постоянны. Таким образом, для ингибирования реакции самовоспламенения смеси силана с воздухом необходимо достаточное количество влаги в окружающем воздухе. Полученные результаты дают важную информацию для моделирования ингибирующих самовоспламенение реакций, связанных с наличием влаги.

2.2. Влияние температуры

На рис. 6 показаны результаты определения критической скорости истечения в нормальный и высушенный окружающий воздух при отложенном и быстром воспламенении в зависимости от температуры силана. Критические скорости истечения силана в сухой окружающий воздух всегда были выше, чем при истечении в нормальный влажный воздух. Очевидно, что критическая скорость не является линейной функцией температуры. При отложенном и быстром воспламенении силана в воздухе критическая скорость связана с гашением потока или диссипацией, необходимыми

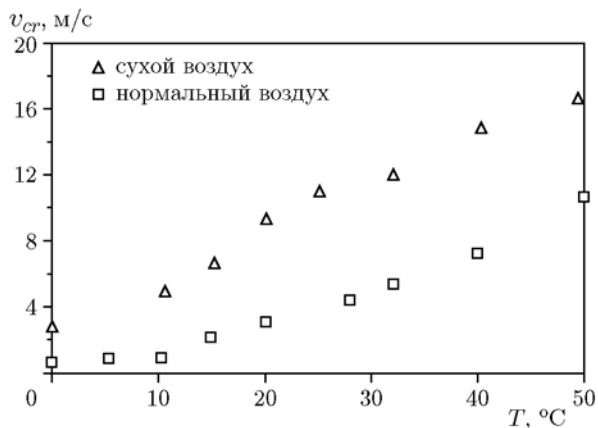


Рис. 6. Зависимость критической скорости истечения от температуры силана при его воспламенении с задержкой и при мгновенном воспламенении

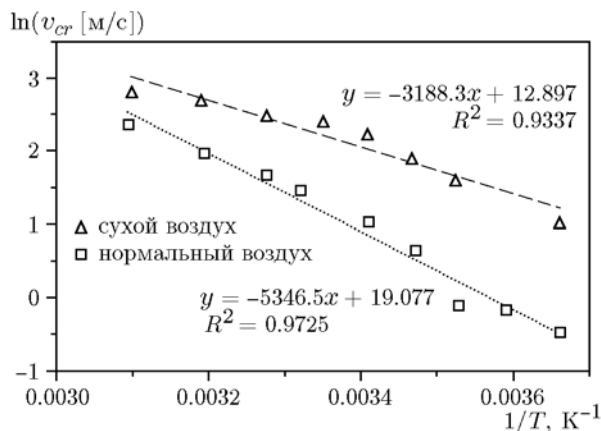


Рис. 7. Зависимость $\ln(v_{cr})$ от T^{-1}

для прекращения реакции воспламенения силана, и, соответственно, является показателем реакционной способности силана в воздухе. Таким образом, разумно предположить, что критическая скорость истечения пропорциональна скорости реакции силана в воздухе, которая, в свою очередь, является аррениусовской функцией температуры:

$$v_{cr} \sim r_a = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) C_a, \quad (1)$$

где r_a — скорость реакции, E_a — энергия активации, A — предэкспоненциальный множитель, T — температура, R — универсальная газовая постоянная, C_a — концентрация газа. Взяв натуральный логарифм, получим

$$\ln v_{cr} \sim \ln r_a = \ln(AC_a) - \frac{E_a}{RT}. \quad (2)$$

В [4] показано, что воспламенение струи силана в воздухе всегда имеет место при наиболее реакционноспособной концентрации, независимо от скорости потока силана. Таким образом, влиянием концентрации воспламенения можно пренебречь и зависимость $\ln(v_{cr})$ от T^{-1} в (2) вырождается в прямую линию, наклон которой может быть использован для определения энергии активации, как показано на рис. 7. Получено, что $E_a = 44.45$ и 26.51 кДж/моль для нормального и сухого атмосферного воздуха соответственно. Полученные результаты дают полезную информацию для моделирования кинетики самовоспламенения силана в воздухе.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ингибирующее действие воды на взрыв водородокислородной смеси хорошо известно [13]. При воспламенении метано- и водородо-воздушных смесей ингибирующая роль воды подтверждена в [14]. Таким образом, современные данные об ингибирующем действии влаги на воспламенение силана в воздухе находятся в соответствии с аналогичными данными, полученными для других топлив, таких как водород и метан. Эти результаты, однако, не согласуются с выводами работы [9] по исследованию воспламенения разбавленного силана, в которой не обнаружено четкого влияния влаги в воздухе на этот процесс. Несоответствие вызвано, вероятно, большим различием в реакционной способности чистого и разбавленного силана. Необходимы дальнейшие исследования для устранения данного противоречия.

Представленные экспериментальные данные о влиянии низкой влажности и температуры показывают, что процесс мгновенного воспламенения силана в воздухе сильно зависит от влаги, содержащейся в воздухе. На самом деле, приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что в реакциях горения силана в воздухе доминируют ингибирующие реакции, связанные с влагой. Во всех экспериментах, выполненных с использованием окружающего воздуха, воспламенение и горение зависели от содержания влаги в воздухе. Это, вероятно, является основной причиной больших расхождений и плохой воспроизводимости результатов экспериментов по воспламенению силана [2, 5, 15]. Таким образом, в дальнейшем влияние влаги надо учитывать.

В плане безопасности истечение силана с отложенным зажиганием всегда представляет потенциальный риск вследствие возможности взрыва [2, 15]. Согласно исследованию струйного пламени силана, проведенному в [16], всегда безопаснее реализовать быстрое воспламенение и струйное пламя при истечении силана в воздух. Настоящее исследование показывает, что быстрое зажигание силана более вероятно при высокой температуре и низкой влажности окружающей среды (как, например, в пустыне).

В заключение отметим, что численные расчеты ламинарного дозвукового истечения силана в затопленное пространство были проведены в [17–20] с помощью программного пакета ANSYS Fluent 15. Рассчитывалось про-

странственное распределение силана в струе. Для определения момента воспламенения использован полуэмпирический критерий — предельная концентрация воспламенения. Доля массы силана в струе, концентрация которого находится между верхним и нижним концентрационными пределами воспламенения, т. е. способной к горению и взрыву, определена в [20].

Период индукции химической реакции в силановых смесях при повышенных давлениях и температурах моделировался в [21–23]. Пределы воспламенения силанокислородных и силановоздушных смесей рассчитаны в [22–24]. Взрывные и детонационные характеристики силановых смесей, в том числе размер детонационной ячейки, оценивались в [20, 25]. Результаты расчетов в [17–25] удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными. В то же время теоретическое моделирование в [17–25] проведено только для сухих смесей и не учитывает влажность воздуха. Экспериментальные результаты, представленные выше, показывают, что модификация теоретических моделей [17–25] должна включать в себя учет влияния влаги на процессы воспламенения, горения и взрыва силановых смесей.

ВЫВОДЫ

Создана камера с контролем влажности и температуры для изучения влияния влаги на воспламенение силана при его истечении в воздух. Установлено, что влага, содержащаяся в воздухе, оказывает сильное ингибирующее действие на самовоспламенение силана. В сухом воздухе критическая скорость деформации потока при различных диаметрах выпускного отверстия остается примерно постоянной. Таким образом, проведенное исследование показывает, насколько важно учитывать влияние влаги на процесс воспламенения и горения силана при его истечении в окружающую среду.

Определена критическая скорость истечения силана в нормальный и осушенный воздух при отложенном и быстром воспламенении. Температура силана при этом варьировалась в диапазоне $0 \div 50$ °С. В предположении применимости закона Аррениуса показано, что логарифм критической скорости пропорционален обратной величине температуры силана. Энергия активации для нормального и сухого воздуха равна 44.45 и 26.51 кДж/моль соответственно.

Следует ожидать, что представленные результаты ускорят теоретические исследования самовоспламенения, горения и взрыва силана во влажной среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Koda S.** Kinetic aspects of oxidation and combustion of silane and related compounds // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 1992. — V. 18. — P. 513–528.
2. **Ngai E. Y., Huang K. P. P., Chen J. R., Shen C.-C., Tsai H.-Y., Chen S.-K., Hu S.-C., Yeh P.-Y., Liu C.-D., Chang Y.-Y., Peng D. Jr., Wu H.-C.** Field tests of release, ignition and explosion from silane cylinder valves // *Process Saf. Prog.* — 2007. — V. 26. — P. 265–282.
3. **Чен Дж.-Р., Цай С.-Ю., Ванг Ш.-В., Ву С.-И., Нгаи Ю. Й., Хуанг К. П.-П.** Воспламенение чистого силана при истечении в воздух в динамическом и стационарном режимах // *Физика горения и взрыва.* — 2010. — Т. 46, № 4. — С. 25–35.
4. **Tsai H. Y., Wang S. W., Wu S. Y., Chen J. R., Ngai E. Y., Huang K. P. P.** Experimental studies on the ignition behavior of pure silane released into air // *J. Loss Prevent. Proc. Ind.* — 2010. — V. 23. — P. 170–177.
5. **Britton L. G.** Combustion hazards of silane and its chlorides // *Plant/Operations Prog.* — 1990. — V. 9. — P. 16–38.
6. **Hartman J. R., Famil-Ghiriha J., Ring M. A., O'Neal H. E.** Stoichiometry and possible mechanism of $\text{SiH}_4\text{—O}_2$ explosions // *Combust. Flame.* — 1987. — V. 68. — P. 43–56.
7. **Kondo S., Tokuhashi K., Nagai H., Iwaska M., Kaise M.** Experimental study of spontaneous ignition limit of oxygen-lean silane mixtures // *Combust. Flame.* — 1994. — V. 97. — P. 296–300.
8. **Kondo S., Tokuhashi K., Nagai H., Takahashi A., Kaise M., Sugie M., Aoyagi M., Mogi K., Minamino S.** Ab initio energetic calculations of elementary reactions relevant to low-temperature silane oxidation by Gaussian-2 theory // *J. Phys. Chem. A.* — 1997. — V. 101. — P. 6015–6022.
9. **Tokuhashi K., Takahashi A., Kondo S.** Spontaneous ignition of silane: Effect of water. — In *Japanese // 36th Symp. (Japanese) on Combustion, Sapporo, Japan, 1998.* — P. 761–763.
10. **Kondo S., Tokuhashi K., Takahashi A., Kaise M.** A numerical study of low temperature silane combustion // *Combust. Sci. Technol.* — 2000. — V. 159. — P. 391–406.
11. **Donovan M. T., He X., Zigler B., Palmer T. R., Walton S. M., Wooldridge M. S.** Experimental investigation of silane combustion and particle nucleation using a rapid-compression facility // *Combust. Flame.* — 2005. — V. 141. — P. 360–370.
12. **Yang T. S., Wu C. H., Yeh C. F.** Analysis of moisture purge in high purity gas distribution systems // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* — 2006. — V. 49. — P. 1753–1759.
13. **Von Elbe G., Lewis B.** The steady-state rate of a chain reaction for the case of chain destruction at walls of varying efficiencies // *J. Amer. Chem. Soc.* — 1937. — V. 59. — P. 970–975.
14. **Seiser R., Seshadri K.** The influence of water on extinction and ignition of hydrogen and methane flames // *Proc. Combust. Inst.* — 2005. — V. 30. — P. 407–414.
15. **Ngai E. Y., Fuhrhop R., Chen J. R., Chao J., Bauwens C. R., Mjelde C., Miller G., Sameth J., Borzio J., Telgenhoff M., Wilson B.** CGA G-13 large-scale silane release tests — Part II. Unconfined silane-air explosion // *J. Loss Prevent. Proc. Ind.* — 2015. — V. 36. — P. 488–496.
16. **Ngai E. Y., Fuhrhop R., Chen J. R., Chao J., Bauwens C. R., Mjelde C., Miller G., Sameth J., Borzio J., Telgenhoff M., Wilson B.** CGA G-13 large-scale silane release tests — Part I. Silane jet flame impingement tests and thermal radiation measurement // *J. Loss Prevent. Proc. Ind.* — 2015. — V. 36. — P. 478–487.
17. **Захарова Ю. В., Федоров А. В.** Расчет истечения и воспламенения струи силана // *Тез. докл. XXIV Всерос. семинара, 11–13 ноября 2015, г. Новосибирск.* — Новосибирск: Параллель, 2015. — С. 72–73.
18. **Федоров А. В., Федорченко И. А.** Расчет выдува дозвуковой струи силана в затопленное пространство // *Динамика многофазных сред: материалы XIII Всерос. семинара (Новосибирск, 8–10 октября 2013 г.) / под ред. В. М. Фомина, А. В. Федорова.* — Новосибирск: Параллель, 2013. — С. 153–156.
19. **Федоров А. В., Захарова Ю. В.** Истечение струи силана в пространство // *Физика горения и взрыва.* — 2017. — Т. 53, № 2. — С. 31–38.
20. **Fomin P. A., Fedorov A. V., Chen J.-R.** Calculation of detonation characteristics of silane-air mixtures // *Proc. of the 11th Intern. Symp. Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Dalian, China, 24–29 July 2016 / Wei Gao (Ed.).* — Dalian Univ. of Technology Electronic & Audio-visual Press, 2016. — P. 59–63.
21. **Тропин Д. А., Федоров А. В.** Физико-математическое моделирование воспламенения и горения силана в проходящих и отраженных ударных волнах // *Физика горения и взрыва.* — 2015. — Т. 51, № 4. — С. 37–45.
22. **Федоров А. В., Фомин П. А., Тропин Д. А., Чен Дж.** Моделирование опасности

- взрыва и смягчении его последствий в силано-воздушных смесях // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 9-10. — С. 108–125.
23. **Tropin D. A., Fedorov A. V.** Ignition limits of silane-air mixtures // Proc. of the 11 Intern. Symp. on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Dalian, China, 24–29 July 2016 / Wei Gao (Ed.). — Dalian Univ. of Technology Electronic & Audio-visual Press, 2016. — P. 1127–1138.
24. **Тропин Д. А., Федоров А. В.** Расчет пределов воспламенения смесей силан — кислород и силан — воздух // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 1. — С. 46–51.
25. **Fomin P. A., Fedorov A. V., Chen J.-R.** Control of explosions in silane-air mixtures by means of chemically inert microparticles // Proc. of the 10th Intern. Symp. on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions, Bergen, Norway, 10–14 June 2014 / T. Skjold, R. K. Eckhoff, K. van Wingerden (Eds). — Bergen: GexCon AS, 2014. — P. 951–958.

Поступила в редакцию 14/IX 2016 г.