

УДК 662.612:32

ИСТЕЧЕНИЕ СТРУИ СИЛАНА В ПРОСТРАНСТВО

А. В. Фёдоров^{1,2}, Ю. В. Захарова¹¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, 630090 Новосибирск²Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск

Вопросы взрыво- и пожаробезопасности силана при его транспортировке и хранении тесно связаны с проблемой его катастрофического истечения из емкостей при возникновении в них трещин. Оказалось, что при некоторых скоростях истечения силан может самовоспламениться. Отметим также интерес, проявленный в аэрокосмической промышленности к проблемам воспламенения и сгорания силана в композициях с другими горючими. Весьма затратное и трудоемкое экспериментальное исследование подобных задач дает первичную информацию для развития и верификации физико-химических математических моделей, которые позволят предсказывать характеристики процессов, протекающих при истечении силана (перемешивание, воспламенение, горение). В недавних экспериментах профессора Дж. Чена с коллегами (Тайвань) были определены критическая длина струи силана (расстояние от среза трубки, на котором происходило возгорание истекающего силана) и время его воспламенения. В данной работе предпринята попытка моделировать эти явления в рамках концепции критической концентрации силана при исследовании динамики его истечения из трубки.

Ключевые слова: дозвуковое осесимметричное струйное истечение, взрыво- и пожаробезопасность силана, математическое моделирование, расстояние задержки воспламенения.

DOI 10.15372/FGV20170204

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим истечение струи силана в неограниченное пространство, заполненное покоящимся воздухом [1–3]. Область течения представлена на рис. 1. Задача решается в осесимметричной постановке (3 — осяевая линия). Граница серой области 2 является стенкой трубки, из которой выдувается воздух. На участке 1 задаются скорость и давление выдува силана, остальная область в начальный момент времени заполнена покоящимся воздухом. На выходных границах 4–6 задаются неотражающие условия. Скорость истечения силана и диаметр среза трубки варьируются в соответствии с параметрами, используемыми в работе [1].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Для расчета истечения силана использовалась модель двухкомпонентной среды (смесь

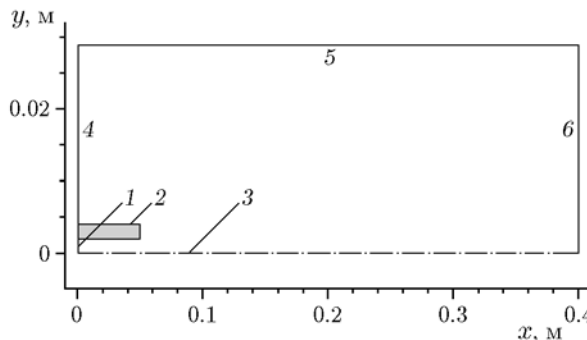


Рис. 1. Схема расчетной области в задаче об истечении силана

воздуха и силана), включающая в себя уравнения Навье — Стокса, дополненные уравнением сохранения массы для относительной массовой концентрации силана и уравнениями состояния идеального газа для составляющих смеси. Для верификации привлекалась модель турбулентности $k-\omega$ SST, замыкающая систему полных осредненных уравнений Навье — Стокса. Для вычисления полей течения смеси использовался программный расчетный комплекс ANSYS Fluent 14.0. В качестве критерия воспламенения принята предельная концентрация силана в объеме. Отметим, что данная величина изменяется в довольно широких пределах [1]. На

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00010).

© Фёдоров А. В., Захарова Ю. В., 2017.

первом этапе исследования струйного истечения и воспламенения силана воспользуемся феноменологическим критерием — понятием предельной концентрации силана. Детальные кинетические схемы неравновесных химических превращений в силане были предложены ранее в литературе, в том числе исследованы и в наших работах [4–13] для моделирования процессов воспламенения, горения и детонации, пределов воспламенения и вопросов подавления детонации. Более подробную библиографию можно найти в указанных публикациях.

ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для верификации расчетных данных об истечении струи газа из канала, полученных с помощью рассматриваемой математической модели, использовались результаты экспериментов [14], в которых исследовалось истечение водорода в спутный поток воздуха. Скорость выдува струи водорода принята равной 2 и 24 м/с, спутного потока — 0.2 и 9.3 м/с соответственно. В экспериментах регистрировалась ширина струи на расстоянии 4.5 диаметра струи от среза сопла, и на основании этих результатов получена эмпирическая зависимость для оценки диаметра струи на указанном расстоянии. Расчетная область аналогична представленной на рис. 1. Шаг разностной сетки выбирался в зависимости от постановки задачи и изменялся в пределах порядка 10^{-4} м. Результаты расчета сопоставлялись с данными эксперимента и эмпирических оценок. Были определены, в частности, распределения массовой концентрации водорода в радиальном направлении на расстоянии 4.5 диаметра сопла от выходного среза в различные моменты времени (рис. 2, 3).

Основываясь на графиках рис. 2, 3, можно определить ширину струи, которая, согласно эксперименту, оценивалась по границе 5%-го содержания водорода в смеси. При истечении струи со скоростью $u = 2$ м/с граница струи в первые моменты времени была нестационарной, но к моменту $t = 20$ мс ее положение становилось установившимся (ср. кривые на рис. 2, соответствующие $t = 18$ и 20 мс). При скорости струи на выходе $u = 24$ м/с также наблюдалось установившееся положение профиля концентраций, но в более позднее время.

Результаты наших расчетов и экспериментов [14] приведены в табл. 1. Их различие составляет не более 20 %.

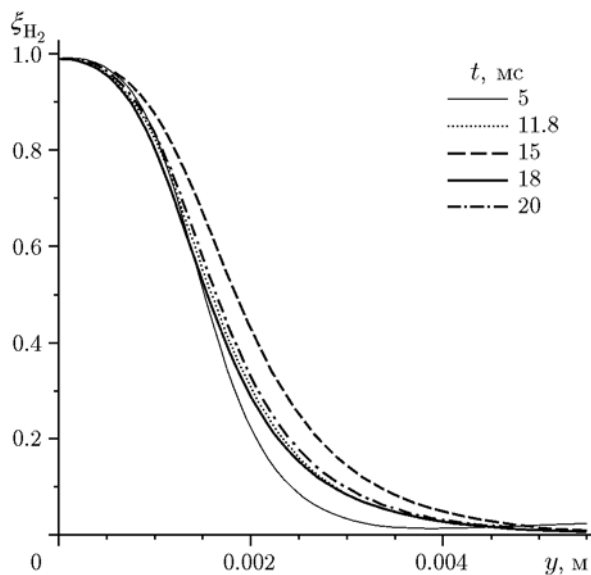


Рис. 2. Профили массовой концентрации водорода в различные моменты времени при скорости струи 2 м/с и спутного потока 0.2 м/с

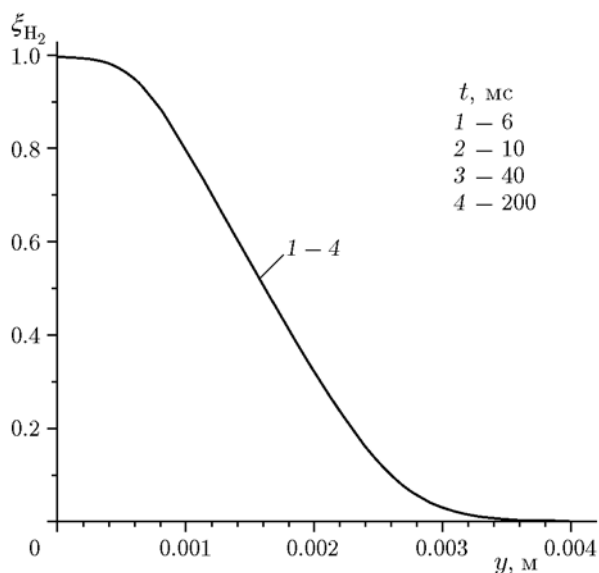


Рис. 3. Профили массовой концентрации водорода в различные моменты времени при скорости струи 24 м/с и спутного потока 9 м/с

Таблица 1
Результаты верификационных расчетов

u , м/с	Диаметр струи, мм		Погрешность, %
	расчет	эксперимент [14]	
2	7.1	5.9	20
24	5.7	4.9	16

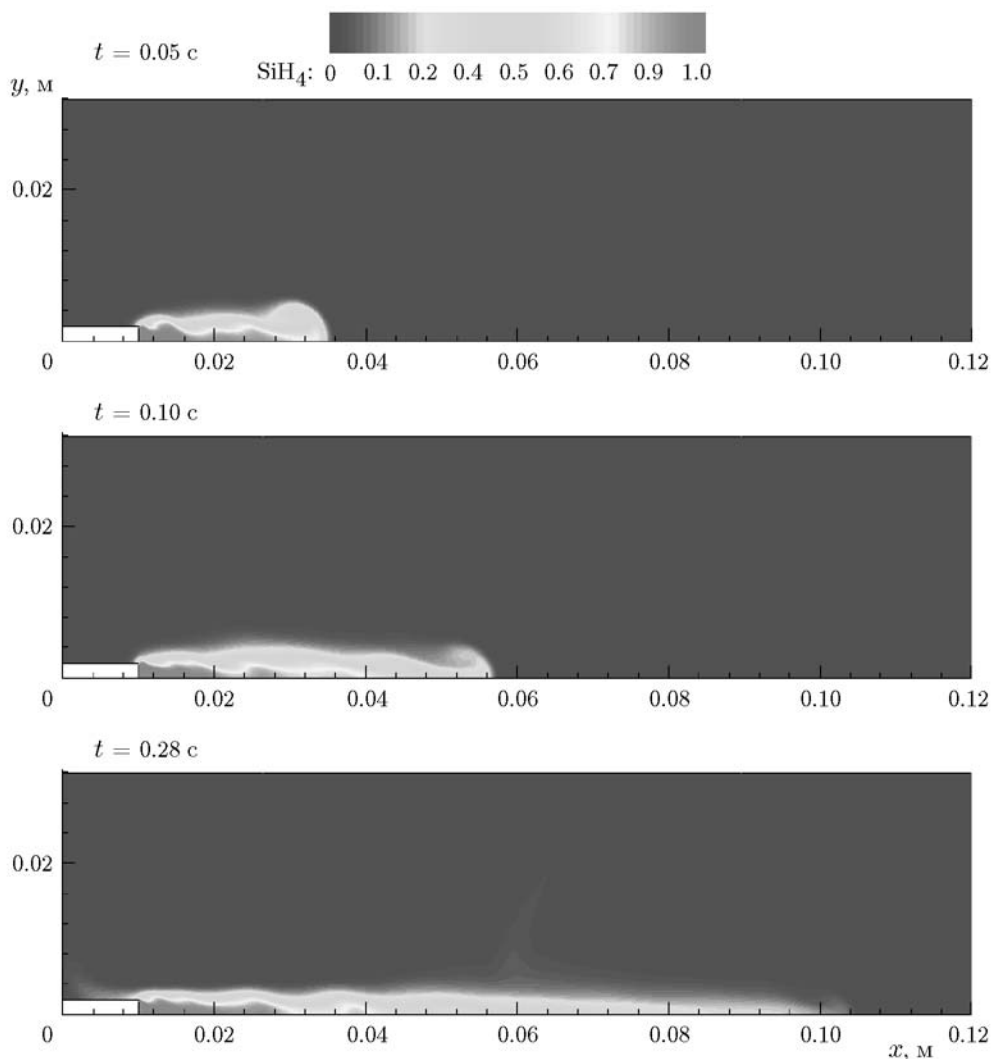


Рис. 4. Массовые концентрации силана в различные моменты времени при диаметре канала $d = 3.86$ мм и скорости выдува $u = 0.94$ м/с

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Картина истечения силана из канала диаметром $d = 3.86$ мм при скорости выдува $u = 0.94$ м/с приведена на рис. 4 и демонстрирует известные особенности струйных дозвуковых течений. На передней кромке струи образуется массивный вихрь с невысокой концентрацией силана. Четко видно ядро струи, в котором концентрация силана высока и которое (ядро) размывается за счет неустойчивости Кельвина — Гельмгольца, возникающей в сдвиговом течении на контактной поверхности между силаном и воздухом. По мере продвижения струи вперед концентрация силана в ней снижается. При этом на некотором расстоянии от среза

трубки сохраняется конечное компактное ядро струи силана с концентрацией в интервале $0.9 \div 1$. На контактной поверхности между струей и воздухом видны слабо выраженные вихревые образования в виде «лисыих хвостов», проникающих в воздух.

С ростом скорости на срезе трубки ($u = 2$ м/с) картина истечения изменяется (рис. 5). «Лисьи хвосты» становятся более мощными. Тем не менее и в этом случае существует компактное ядро истекающего потока силана. Оно наблюдается вплоть до расстояния $x = x_{cr} \approx 0.04$ м (в предыдущем случае — примерно 0.03 м). Естественно, что данное ядро размывается за счет развития неустойчивости Кельвина — Гельмгольца и развиваются «лисыи хво-

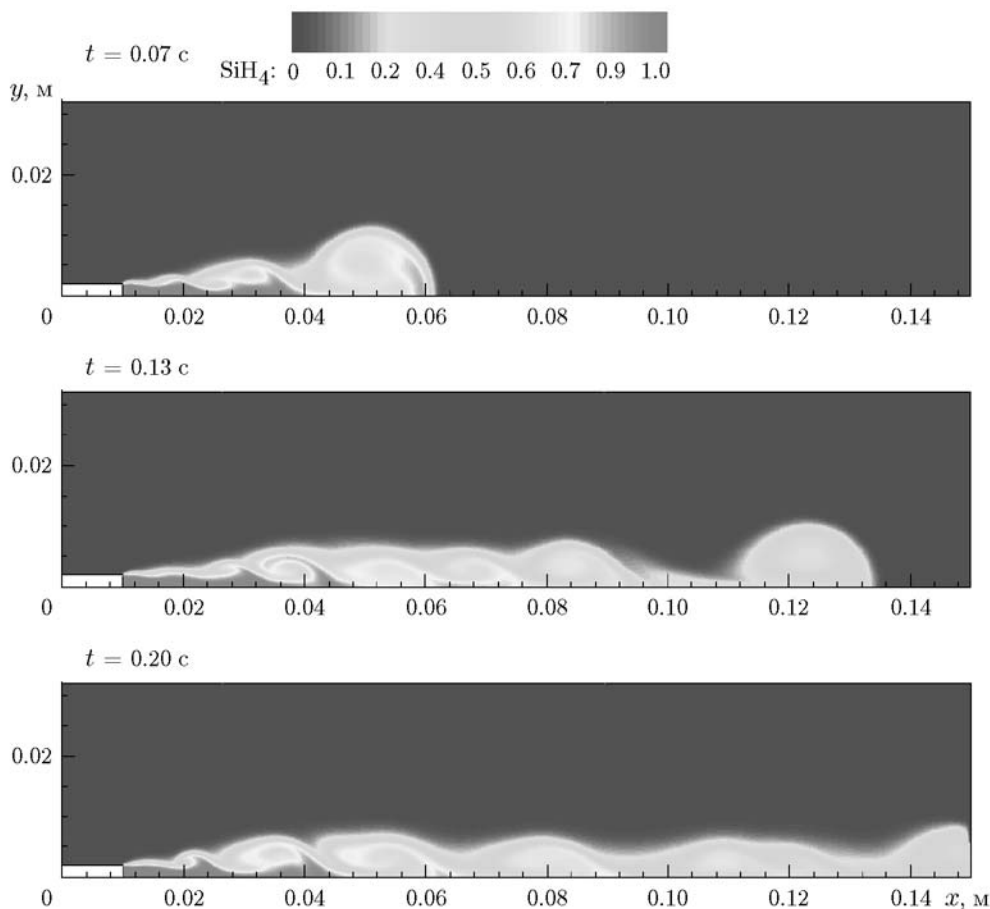


Рис. 5. Массовые концентрации в различные моменты времени при диаметре канала $d = 3.86$ мм и скорости выдува $u = 2$ м/с

сты» (см. рис. 4, 5). Отметим, что рост скорости истечения приводит к более выраженному проявлению неустойчивости. Это реализуется в увеличении головного вихря на передней кромке струи и в еще более массивных «лисыих хвостах», т. е. в значительно более выраженном вихреобразовании на контактной границе (ср. с данными по подъему пыли в [15, 16]).

В последующем происходит установление стационарного истечения. Для рассмотрения этого вопроса были выбраны скорости истечения силана 1, 2, 4 и 6 м/с при диаметре выходного среза трубки $d = 3.86$ мм. На рис. 6 показаны профили концентрации силана в различные моменты времени в разных поперечных сечениях струи при скорости истечения $u = 1$ м/с. Видно, что по мере развития течения массовая доля силана на оси симметрии растет по отношению к содержанию силана вблизи контактной границы и достигает некоторого стационарного положения тем быстрее, чем бли-

же сечение к срезу трубки. Отметим, что на рис. 6, в, г в момент времени $t = 0.5$ с струя еще не вторглась в данную область пространства и поэтому соответствующей линии нет на рисунках.

На рис. 7 приведены изолинии концентрации силана в различные моменты времени при $u = 1$ м/с. Видно, что изолиния концентрации, например, $\xi_{\text{SiH}_4} = 0.4$ со временем занимает определенное постоянное положение. Это свидетельствует о формировании ядра струи.

Теперь обратимся к понятию критической концентрации силана ξ_* , при которой происходит воспламенение смеси [1]. По данным экспериментов [1] и приведенным в литературе различным оценкам она изменяется в весьма широком диапазоне. Оценим критическую концентрацию значением $\xi_* = 75\%$. Были построены зависимости положения точки с критической концентрацией от времени при различных скоростях выдува и определено время достижения

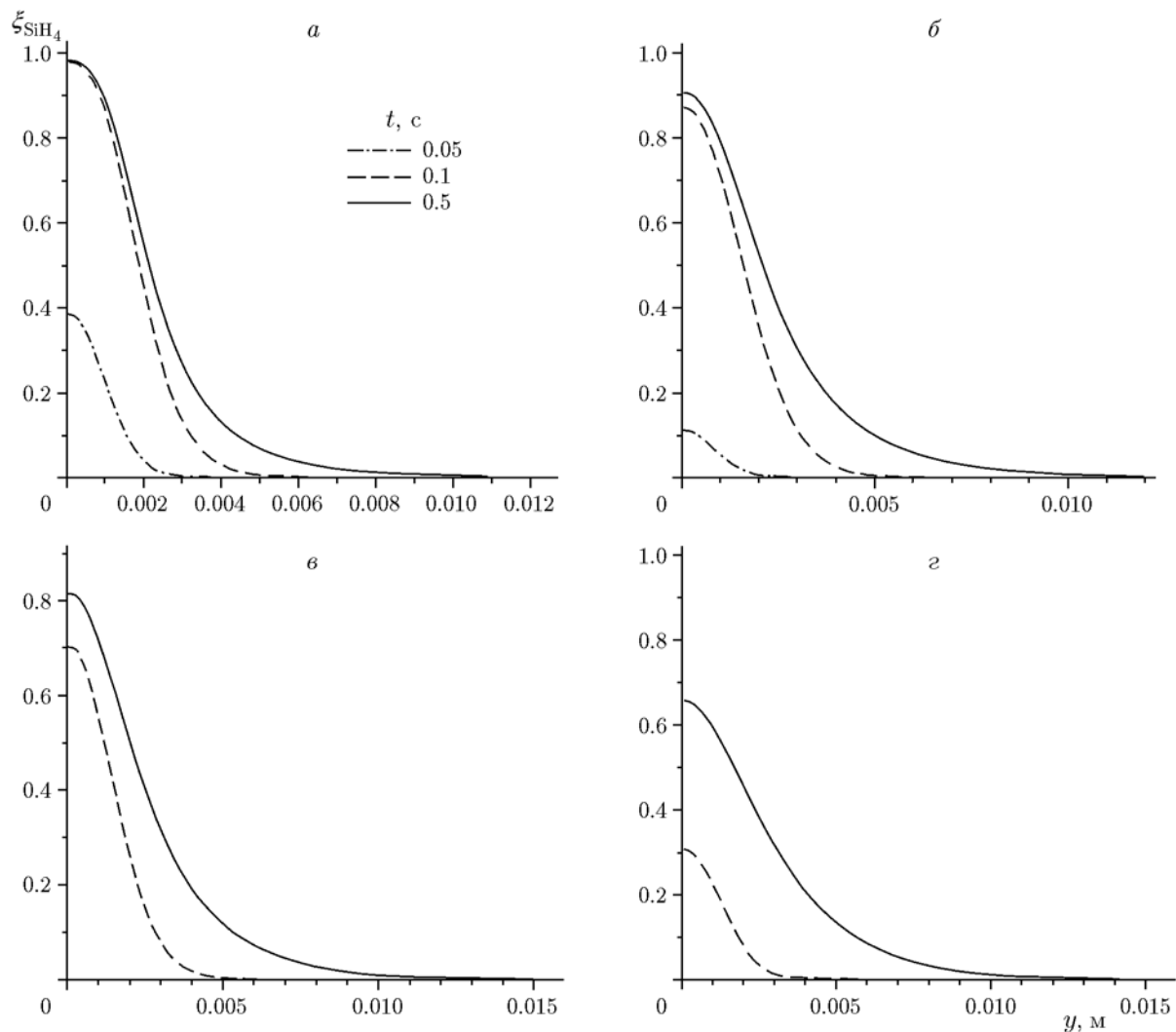


Рис. 6. Профили массовой концентрации силана в поперечных сечениях на расстоянии 10 (а), 20 (б), 30 (в), 50 мм (г) от среза трубки в различные моменты времени

этой точкой экспериментально наблюдаемого расстояния от среза сопла, на котором происходит воспламенение. Полученная зависимость представлена на рис. 8. По оси ординат отложено время, обезразмеренное на критическое время при скорости 4 м/с. Видно, что эти зависимости близки для двух разных диаметров трубки и имеют тенденцию к уменьшению времени задержки воспламенения при увеличении скорости выдува.

Остановимся далее на описании расстояния воспламенения силана (расстояние от среза трубки, на котором воспламеняется газ) в зависимости от скорости инъекции. Часто принимают [1], что наиболее реакционноспособная область воспламенения возникает при отноше-

нии объемных расходов вовлеченного воздуха и силана 0.322 ± 0.076 , что эквивалентно принятой выше наиболее реагирующей концентрации силана в воздухе 75 %. Из приведенных на рис. 4, 5 результатов расчета концентрации силана в выдуваемой струе видно, что при заданной скорости истечения высокая концентрация силана сохраняется на расстоянии до 50 мм от среза отверстия.

По результатам расчетов проведена также оценка расстояния воспламенения в зависимости от скорости выдува. В качестве критерия воспламенения принимался факт достижения в определенном сечении струи осредненной концентрации силана, близкой к 0.75. Полученные значения были сопоставлены с эксперимен-

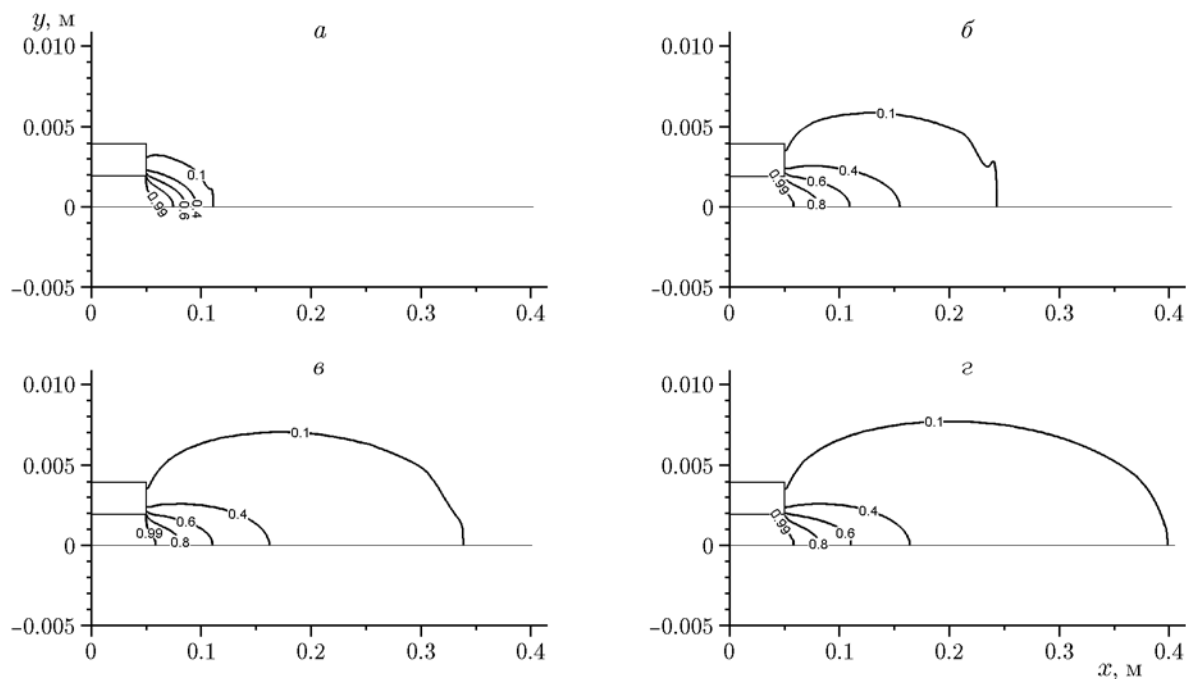


Рис. 7. Изолинии массовой концентрации силана в моменты времени 0.1 (а), 0.5 (б), 1 (в), 1.5 с (г)

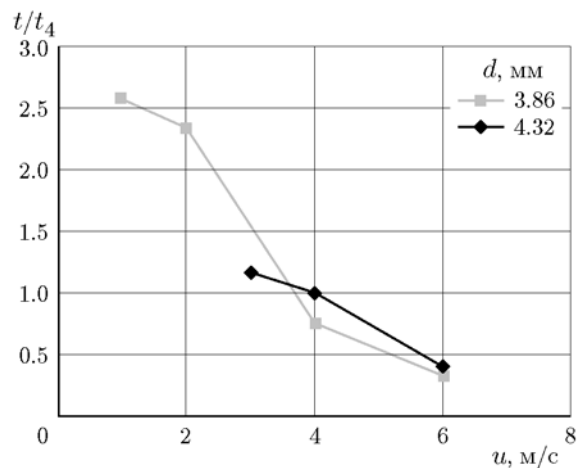


Рис. 8. Зависимость критического времени возгорания силана от скорости выдува

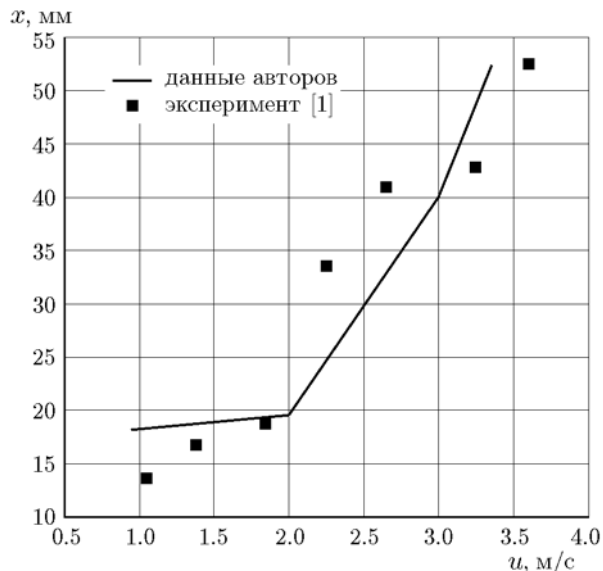


Рис. 9. Расстояние воспламенения силана в зависимости от скорости инъекции ($d = 3.86$ мм)

тальными данными [1] (рис. 9), которые также усреднялись. Расчетные данные в целом удовлетворительно согласуются с данными эксперимента.

Средние концентрации силана при различных скоростях выдува из трубки диаметром $d = 3.86$ мм, которые использовались при построении кривой воспламенения в плоскости скорость — расстояние воспламенения, приведены в табл. 2.

По результатам расчетов была определена дальность струи D при различных скоростях выдува. Дальность определялась как точка в струе, где скорость падает на 90 % (рис. 10). Для этого были построены профили скорости и давления в различных попереч-

Таблица 2
Средняя концентрация силана

u , м/с	x , мм	ξ_{SiH_4}
1	17	0.66
2	20	0.71
3	40	0.63
4	75	0.66

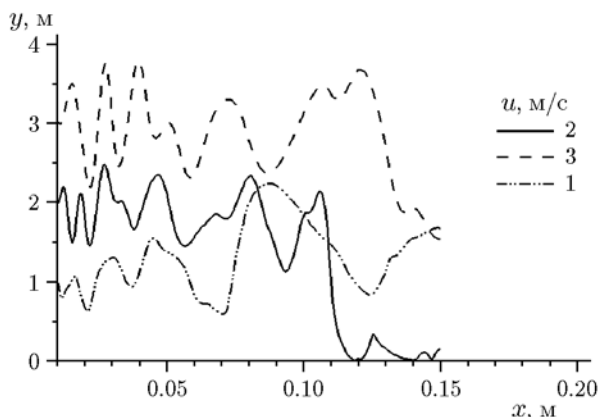


Рис. 10. Профили скорости струи в поперечных сечениях при различных скоростях инжекции ($d = 3.86$ мм)

Таблица 3
Дальнобойность струи ($d = 3.86$ мм)

u , м/с	D , мм	D/d
1	100	25.9
2	140	36.2
2.2	150	38.8
3	>160	41.4

ных сечениях вниз по потоку. Колебательный профиль скорости (см. рис. 10) обусловлен вихрями, срывающимися с контактной границы струи.

В целом, можно сказать, что при $d = 3.86$ мм струя распространяется на расстояние $x \approx 150$ мм, а дальше происходит ее размывание. При увеличении скорости и диаметра инжекции струи дальнобойность существенно увеличивается. Результаты по дальнобойности струи приведены в табл. 3.

ВЫВОДЫ

Численно исследована задача об истечении силана из трубки в неподвижную среду, моделирующая катастрофическое истечение силана из емкости хранения. Результаты расчетов дают детальную информацию о распределении концентраций силана и воздуха в струе; о динамических и термодинамических параметрах смеси; о дальнобойности струи при изменении скорости на срезе трубки в диапазоне $1 \div 4$ м/с при различных геометрических параметрах трубки.

Получено удовлетворительное согласование расчетных данных с экспериментальной зависимостью расстояния воспламенения от скорости, т. е. показана применимость концепции предельной концентрации к описанию процесса воспламенения силана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tsai H.-Yu., Wang Sh.-W., Wu S.-Y., Chen J.-R., Y. Ngai E., Huang K. P.-P. Experimental studies on the ignition behavior of pure silane released into air // J. Loss Prevention in the Process Ind. — 2010. — V. 23. — P. 170–177.
2. Simone D., Bruno C., Hidding B. Silanes as fuel for aerospace propulsion // Trans. JSASS, Aerospace Technol. Jap. — 2009. — V. 7, iss. 26. — P. 33–39.
3. Фёдоров 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.
4. Тропин Д. А., Федоров А. В. Математическое моделирование химических превращений в силане // Там же. — С. 143–145.
5. Фомин П. А., Федоров А. В., Чен Дж.-Р. Управление параметрами взрыва силановоздушной газовой смеси путем добавления химически инертных частиц // Там же. — С. 161–163.
6. Fomin P. A., Fedorov A. V., Chen J.-R. Parameters for attenuation and suppression of detonation wave with inert particles // Chem. Eng. Trans. — 2013. — V. 31. — P. 848–852.
7. Тропин Д. А., Федоров А. В. Физико-математическое моделирование детонационного сгорания силана // Новые математические модели механики сплошных сред: построение и изучение: Всерос. конф., приуроченная к 95-летию акад. Л. В. Овсянникова (Новосибирск, 18–22 апреля 2014 г.): тез. докл. — Новосибирск, 2014. — С. 139.

8. **Fomin P. A., Fedorov A. V., Chen J.-R.** Control of explosions in silane-air mixture by means of chemically inert microparticles // Proc. 10th Intern. Symp. on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions Bergen, Norway, 10–14 June 2014. — Bergen: GexCon AS, 2014. — P. 951–958.
9. **Tropin D. A., Fedorov A. V.** Physical and mathematical modelling of the ignition and combustion of silane in transient and reflected shock waves // Ibid. — P. 959–971.
10. **Тропин Д. А., Федоров А. В.** Физико-математическое моделирование воспламенения и горения силана в проходящих и отраженных ударных волнах // Забабахинские научные чтения: сб. материалов XII Междунар. конф., 2–6 июня 2014. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2014. — С. 126.
11. **Фомин П. А., Воронин Д. В., Федоров А. В., Чен Дж.-Р.** Расчет взрывных характеристик силано-воздушной смеси // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии: сб. науч. ст. — Днепропетровск: НПВК «Триакоп», 2014. — № 1 (14). — С. 121–126.
12. **Федоров А. В., Фомин П. А., Тропин Д. А., Чен Дж.** Моделирование опасности взрыва и смягчение его последствий в силано-воздушных смесях // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 9-10. — С. 108–125.
13. **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.
14. **Баев В. К.** Геометрия и устойчивость турбулентных пламен газообразных топлив: дис. ... д-ра техн. наук. — Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1972.
15. **Федоров А. В., Федорова Н. Н., Федорченко И. А., Фомин В. М.** Математическое моделирование подъема пыли с поверхности // ПМТФ. — 2002. — Т. 43, № 6. — С. 113–125.
16. **Fedorov A. V., Fedorova N. N.** Numerical simulation of dust lifting under the action of shock wave propagating along the near-wall layer // J. Phys. (France). — 2002. — V. 12. — Pr. 7-97–7-104.

*Поступила в редакцию 20/VI 2016 г.,
в окончательном варианте — 22/IX 2016 г.*
