

СКОЛЬЖЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ И УДАРНЫХ ВОЛН ПО ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

A. A. Борисов, С. М. Когарко, А. В. Любимов
(Москва)

Особенности взаимодействия детонационных и ударных волн, распространяющихся в газовой среде, с поверхностью жидкости при скольжении волн по поверхности в последнее время заинтересовали многих исследователей. Этот интерес вызван в основном проблемами техники безопасности при транспортировке воздуха и взрывчатых смесей по трубопроводам [1—3]. Взаимодействие детонационной волны с поверхностью инертного газа изучено хорошо [4, 5].

Целью настоящей работы являются исследования всех стадий взаимодействия детонационных и ударных волн с поверхностью жидкости при скольжении волн по поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим взаимодействие детонационной волны с поверхностью жидкости при скольжении. Почти все полученные результаты применимы и для ударной волны. При движении детонационной волны над поверхностью жидкости могут возникнуть два режима взаимодействия в зависимости от соотношения между скоростью детонационной волны D и скоростью звука в жидкости c_1 .

1. Первый режим имеет место, если $D > c_1$ (рис. 1). При взаимодействии детонационной волны с жидкостью возникает присоединенная ударная волна 5 (в газе — волна разрежения), которая ориентирована под углом α_1 к поверхности жидкости. Анализ взаимодействия на диаграмме давление — угол поворота потока (p, χ) (рис. 2) показывает, что ударная волна 5 и все последующие волны в жидкости — акустические. Если слой жидкости ограничен стенкой трубы из упругого материала, то возникает огра-

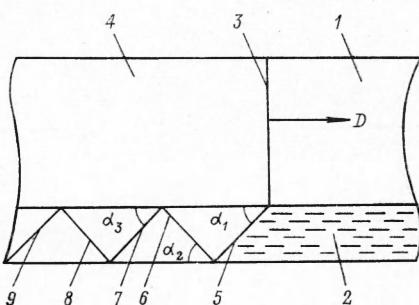


Рис. 1. Схема взаимодействия детонационной волны с жидкостью при $D > c_1$.
1 — взрывчатая смесь; 2 — жидкость; 3 — детонационный фронт; 4 — продукты детонации; 5 — присоединенная ударная волна; 6 — отраженная ударная волна; 7 — первичная отраженная волна разрежения; 8 — отраженная волна разрежения; 9 — вторично отраженная ударная волна.

женная ударная волна 6 (рис. 1) с удвоенной амплитудой давления и углом отражения $\alpha_2 = \alpha_1$. Дальше происходит целый ряд отражений от стенки и свободной поверхности жидкости с образованием системы из ударных волн и волн разрежения в жидкости.

Для конкретной смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ и воды при начальном давлении $p_0 = 1 \text{ at}a$ получаем уравнение прямой 1 (см. рис. 2):

$$p_1 - p_0 = 5 \cdot 10^{10} \chi_1$$

и уравнение кривой 2:

$$p_1/p_g = 1 - 1 \cdot 4\chi_1^{2/3}.$$

Решая эту систему относительно p_1 и χ_1 , получаем

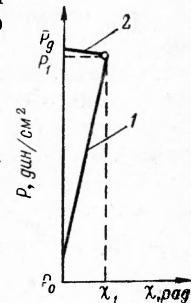
$$\chi_1 = 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ rad}, p_1 = 0,9995 p_g, \text{ т. е. } p_1 \approx p_g.$$

Давление в волне 6 $p_2 = 2p_1$, в волне 7 $p_3 = p_1$, в волне 8 $p_4 = p_0$, в волне 9 $p_5 = p_1$ и т. д. Этот пакет волн, движущихся в жидкости за детонационной волной, можно характеризовать некоторой эффективной длиной волны λ_0 . Если глубина слоя жидкости h_0 , то

$$\lambda_0 = 4h_0 (D^2/c_1^2 - 1)^{1/2}.$$

Рис. 2. Диаграмма для случая взаимодействия детонационной волны с поверхностью жидкости при $D > c_1$.

p_0 — начальное давление смеси; p_g — давление в детонационной волне; p_1 и χ_1 — давление и угол поворота потока после взаимодействия.



В конечном по длине слое жидкости происходит взаимодействие пакета волн с торцом трубы или со свободной поверхностью. При этом отразится новая система волн или в фазе (на жесткой стенке) или в противофазе (на свободной поверхности). Интерферируя с хвостом падающего пакета, новый пакет дает систему типа стоячей волны. Расстояния между узлами или пучностями в этой системе равны λ_1 , где $\lambda_1 = \lambda_0/2 = 2h_0 (D^2/c_1^2 - 1)^{1/2}$.

2. Второй режим взаимодействия имеет место, если $D < c_1$ (рис. 3). В момент прихода детонационной волны 3 на поверхность жидкости в ней возникает преломленная цилиндрическая ударная волна 6. Она уходит от точки возникновения со скоростью c_1 и обгоняет детонационную волну 3, так как $D < c_1$. При этом образуется боковая ударная волна 5, идущая по взрывчатной смеси перед детонационным фронтом. Угол наклона боковой волны к поверхности жидкости $\beta = \arcsin c_2/c_1$, где c_2 — скорость звука во взрывчатой смеси. Картина движения нестационарна, боковая волна передвигает-

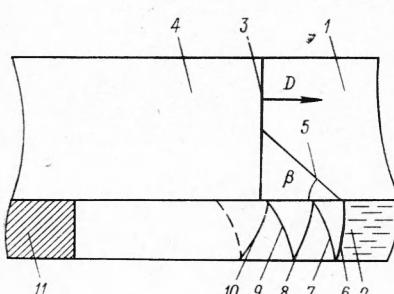


Рис. 3. Схема взаимодействия детонационной волны с жидкостью при $D < c_1$.

1 — взрывчатая смесь; 2 — жидкость; 3 — детонационный фронт; 4 — продукты детонации; 5 — боковая ударная волна; 6 — преломленная ударная волна; 7 — отраженная ударная волна; 8 — первичная отраженная волна разрежения; 9 — отраженная волна разрежения; 10 — вторичная отраженная волна; 11 — вставка.

ся одним своим концом по детонационному фронту вверх. Преломленная ударная волна 6, отражаясь от стенки трубы, приводит к появлению системы ударных волн и волн разрежения, аналогично ранее рассмотренному случаю 1. Во втором случае все волны цилиндрические, кроме боковой волны 5, система волн — акустическая и быстро затухает.

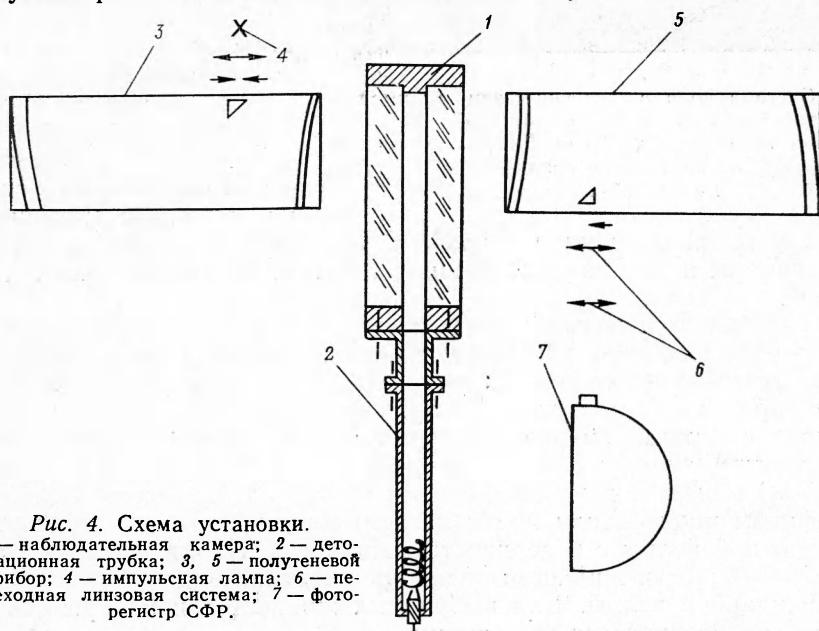
Для выяснения дальнейшего поведения жидкости исследуем на устойчивость возникший тангенциальный разрыв (почти покоящаяся жидкость — движущийся газ) с учетом поля тяжести и сил поверхностного натяжения. Для этого воспользуемся критерием устойчивости по Ландау [6]:

$$u_0^4 \leq \frac{4\alpha g (\rho - \rho_1) (\rho + \rho_1)^2}{\rho^2 \rho_1^2},$$

где u_0 — максимальная скорость газа при устойчивом режиме; α — коэффициент поверхностного натяжения; g — ускорение свободного падения; ρ — плотность жидкости; ρ_1 — плотность продуктов детонации. При $\rho \gg \rho_1$ получаем выражение для критерия устойчивости:

$$u_0^4 \leq \frac{4\alpha g \rho}{\rho_1^2}.$$

Для случая детонации смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ над поверхностью глицерина $u_0 \ll 8 \text{ м/сек}$. Скорость продуктов детонации почти везде больше u_0 , поэтому поверхность жидкости находится в неустойчивом состоянии, и



Rис. 4. Схема установки.
1 — наблюдательная камера; 2 — детонационная трубка; 3, 5 — полутеневой прибор; 4 — импульсная лампа; 6 — переходная линзовая система; 7 — фото-регистр СФР.

рассмотренные выше системы волн, естественно, приведут к появлению и последующему развитию во времени возмущений поверхности жидкости. При возмущении поверхности жидкости частицы жидкости срываются потоком газа и дробятся до образования мельчайших капелек [7].

Оценка количества жидкости, которое может испариться с поверхности за волной за характерное время процесса распыла 500 $\mu\text{сек}$, проведенная по расчетам теплового потока в ударной трубе из газа в

стенки [8, 9], дает $5 \cdot 10^{-8}$ г воды с 1 см^2 поверхности жидкости. Эффект от испарения с гладкой поверхности жидкости очень мал. Учет вязкости при распыле жидкости за характерное время порядка 500 мксек также дает очень малый результат.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для исследования взаимодействия детонационного и ударного фронта с поверхностью жидкости использовалась экспериментальная установка (рис. 4). Камера с двумя прозрачными боковыми стенками имела прямоугольное сечение $27 \times 28 \text{ мм}$ и длину 37 см и соединялась с детонационной трубкой (диаметр 15 мм и длина 50 см). Инициирование детонационной волны в трубке осуществлялось электрической искрой, в детонационную трубку вставлялась спираль для уменьшения преддетонационного периода. Процессы взаимодействия исследовались с помощью полутеневого прибора, совмещенного с фоторегистром СФР или с кинокамерой СКС [10]. При наблюдении картины взаимодействия полутеневой прибор настраивался или на жидкость или на газ.

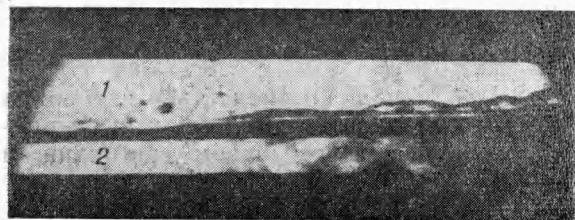


Рис. 5. Система волн в глицерине при взаимодействии детонационной волны в смеси $2\text{H}_2 + n\text{O}_2$ с поверхностью глицерина, $p_0 = 1 \text{ ата}$. Детонационная волна идет слева направо.

1 — газ; 2 — жидкость.

как технический вазелин и парафин. Парафин в опытах наносился на дно камеры в расплавленном виде, а затем, застывая, давал твердый слой.

Небольшое количество экспериментов с керосином и цетаном было проведено на большой ударной трубе, описанной в работах [11, 12]. Исследовалось воспламенение образующихся смесей керосина или цетана с кислородом или воздухом в ударных волнах.

Эксперименты в камере со взрывчатой смесью $2\text{H}_2 + n\text{O}_2$ (меняя n от 1 до 6, можно изменять скорость детонационной волны от 2820 м/сек до 1700 м/сек) и выбранными жидкостями вместе с техническим вазелином и парафином подтвердили предполагаемые результаты взаимодействия детонационной волны с поверхностью жидкости. Наблюдалась неустойчивость поверхности жидкости после прохождения над ней детонационной или ударной волны. Для выбранных жидкостей и материалов неустойчивость развивается по-разному.

Опыты с глицерином ($D > c_1$). Глицерин удобен для работы тем, что дает возможность наблюдать результаты взаимодействия и в жидкости и в газе. Взаимодействие детонационной волны с поверхностью глицерина можно условно разбить на четыре фазы.

Первая фаза длится около 300 мксек (рис. 5), начиная от момента прихода детонационной волны на поверхность жидкости. Видна система волн в глицерине $\alpha_{1t} = 44^\circ$; $\alpha_{19} = 45^\circ \pm 3^\circ$, $\alpha_2 = \alpha_1$ и т. д. На этой стадии

Для исследования были выбраны взрывчатые смеси: $2\text{H}_2 + n\text{O}_2$, $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$; газы: кислород и воздух; пять различных жидкостей: вода, глицерин, ртуть, керосин, цетан. Выбор этих жидкостей обусловлен разнообразием их свойств. Керосин и цетан (гексадекан $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$) выбраны как горючие жидкости с малым давлением пара. Были использованы также такие материалы,

поверхность жидкости остается гладкой. Меняя глубину слоя глицерина h_0 , можно менять характерную длину волны λ_0 пакета волн.

Вторая фаза начинается с видимого возмущения поверхности глицерина и продолжается до сильного выпучивания поверхности. Эта фаза длится около 500 мкsec (рис. 6). Средняя скорость подъема жидкости вверх около 20 м/сек, что хорошо согласуется с оценочными результатами

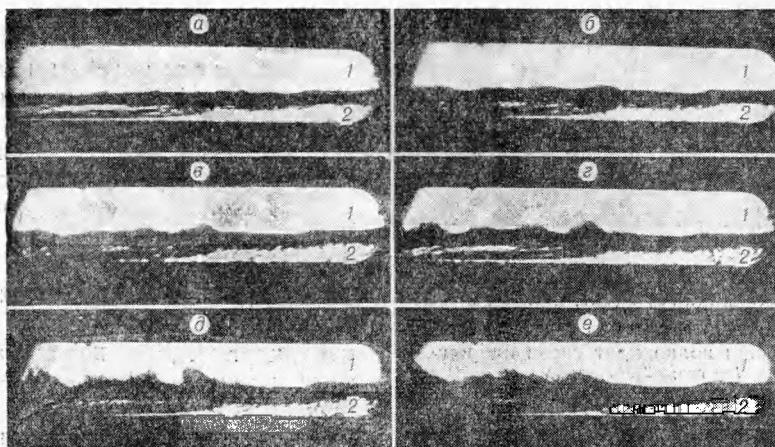


Рис. 6. Распыл глицерина после прохождения детонационной волны в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Детонационная волна прошла слева направо. Время между кадрами 95 мкsec.

1 — газ; 2 — жидкость.

ми. Выпучивание поверхности жидкости происходит с определенной периодичностью. Длина волны, вытекающая из этой периодичности (λ_{1t}) сравнивается с λ_{1t} , полученным во введении (рис. 7). Хорошее соответствие этих величин говорит о правильности предположения о причинах выпучивания жидкости. Во время третьей фазы жидкость, сорвавшаяся с поверхности, дробится потоком газа до мельчайших капелек и заполняет всю камеру густым туманом. Эта фаза продолжается около 400 мкsec.

Четвертая фаза связана с оседанием тумана в успокоившемся газе в поле тяжести и дает возможность оценить средний размер капель глицерина. Оседание длится около 4 мин, это дает радиус капель $R \approx 0,5$ мк. Дробление очень мелкое.

Опыты с глицерином ($D < c_1$). Для этого случая система волн, возникшая в жидкости при выходе детонационной волны на поверхность, очень слабая и быстро затухает. Данная методика наблюдения взаимодействий не дает возможности видеть эту систему волн в глицерине. Но последующее протекание процесса взаимодействия совпадает с протеканием процесса при $D > c_1$. Происходит распыл части глицерина с образованием тумана.

Опыты с водой и ртутью ($D > c_1$). В опытах с водой можно наблюдать картину взаимодействия только в жидкости: пары, осевшие на стеклах, мешают наблюдениям в газе.

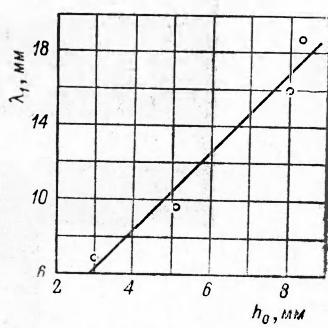


Рис. 7. Изменение расстояния между пучностями при распыле глицерина λ_1 с глубиной слоя глицерина h_0 . Прямая линия — теоретическая.

Картина взаимодействия на первой стадии совпадает с предполагаемой (рис. 8). Хорошо видна система волн $\alpha_{1g}=30^\circ \pm 3^\circ$, $\alpha_{1r}=29^\circ$. В результате возникает густой туман.

В опытах с ртутью хорошо видно образование распыла (рис. 9). Выбросы с поверхности ртути мельче, оседание сорванных и измельченных капелек происходит быстрее, чем в воде и глицерине, но сам процесс распыла очень интенсивный.

Опыты с керосином и цетаном ($D>c_1$ и $D< c_1$). Опыты с керосином и цетаном были поставлены для того, чтобы проверить, как происходит взаимодействие детонационной и ударной волн с поверхностью горючей жидкости. Для детонационной волны в смеси $2\text{H}_2+\text{O}_2$ картина взаимодействия идентична картинам в воде и глицерине. Для керосина и цетана использовалась также обогащенная кислородом смесь

Рис. 8. Система волн в воде при взаимодействии детонационной волны в смеси $2\text{H}_2+\text{O}_2$ с поверхностью воды при $p_0=1$ ата. Детонационная волна идет слева направо.
1 — газ; 2 — жидкость.

$2\text{H}_2+6\text{O}_2$ для создания вторичной смеси кислорода, оставшегося после реакции в детонационной волне, с распылом горючего. Если брать большое количество горючего (слой жидкости толщиной 2 мм и выше), то в распыле уходит такое большое количество керосина или цетана, что возникшая вторичная смесь гореть не может. Если же брать мало горючего (слой толщиной 0,03 см и меньше), то образовавшаяся вторичная смесь частично выгорает.

Для более детального исследования выгорания образующейся смеси кислорода и капель горючего распыл создавался не детонационной, а ударной волной в чистом кислороде или воздухе при начальном давлении 1 ата и ниже. Ударная волна возбуждалась: 1) методом детонационной ударной трубы, в камере сжатия которой находилась смесь $2\text{H}_2+\text{O}_2$ или смесь CH_4+2O_2 при давлении 1 ата; 2) методом чистой

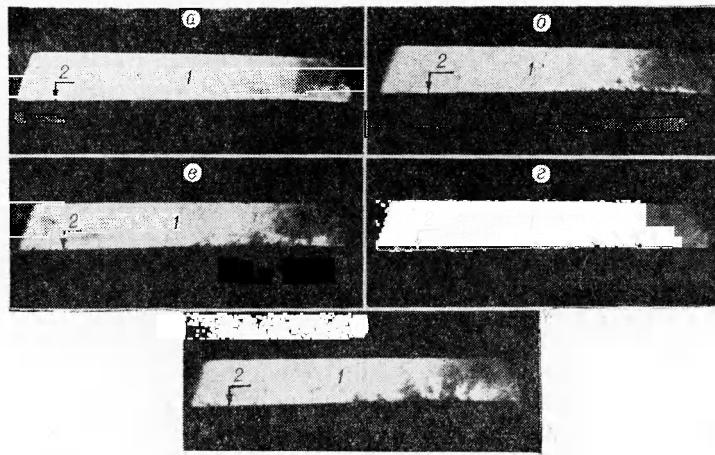


Рис. 9. Распыл ртути после прохождения детонационной волны в смеси $2\text{H}_2+\text{O}_2$. Время между кадрами 360 мксек.
1 — газ; 2 — жидкость.

ударной трубы, в камере сжатия которой находились азот или гелий. По первому методу регистрировалась полуутеневая картина взаимодействия и самовоспламенение, по второму — скорость падающей ударной волны и свечение при воспламенении. Возникшая гетерогенная смесь горючего и кислорода, полученная по первому методу для ударных волн с $M \leq 2$ (где M — число Маха), выгорает очень медленно. Поджиг осуществляется горячими продуктами детонации, пришедшими из камеры сжатия. По второму методу для ударных волн с $M > 2$, наблюдается воспламенение гетерогенной смеси горючего и кислорода в отраженных и падающих ударных волнах. Так, для цетана, введенного в ударную трубу в количестве 4 мл в месте, близком к торцу трубы, и кислорода при начальном давлении 100 мм рт. ст. наблюдается воспламенение смеси в отраженной волне с задержками воспламенения $\tau = 500 \text{ мксек}$ для числа Маха падающей волны, равном 2,3 ($T_{\text{отр}} = 900^\circ \text{К}$ — температура в отраженной ударной волне). Для смеси цетана с воздухом при тех же начальных условиях наблюдались зачатки воспламенения при $M = 2,6$ ($T_{\text{отр}} = 1060^\circ \text{К}$). Возникающая при распыле гетерогенная смесь сгорает в газовой фазе, к этому выводу приводит оценка времени, необходимого для нагрева и испарения образовавшихся микронных капелек горючего; время испарения для керосина порядка 10 мксек, время прогрева — порядка 1 мксек. Таким образом, процесс воспламенения определяется в основном временем распыла топлива до капель микронного размера.

Опыты с техническим вазелином и твердым парафином. Технический вазелин очень вязкий материал, а затвердевший парафин сравнительно мягкий. На рис. 10 показан распыл слоя технического вазелина высотой 3 мм за детонационной волной в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$. После опыта наблюдается густой туман из капелек вазелина. При очень тонких пленках вазелина ($h_0 \approx 0,01 \text{ мм}$) почти весь вазелин уходит в распыл. Интересно, что парафин, взаимодействуя с детонационной волной, ведет себя подобно жидкости. Наблюдаются выбросы с поверхности и образование распыла из мелких частиц парафина.

Таким образом, экспериментально подтверждена неустойчивость поверхности жидкости и вязких материалов при скольжении по ней

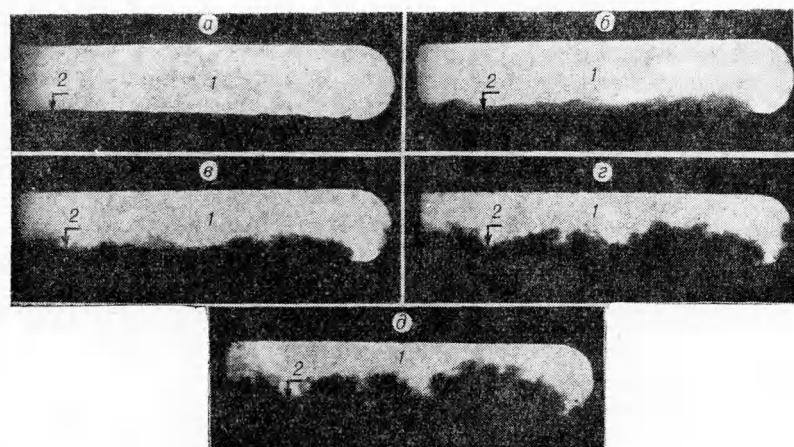


Рис. 10. Распыл технического вазелина после прохождения детонационной волны в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ при $p_0 = 1 \text{ ата}$. Время между кадрами 190 мксек.
1 — газ; 2 — жидкость.

детонационной или ударной волны. Наблюдалось развитие этой неустойчивости в различных жидкостях и вязких материалах вплоть до образования густого тумана из мельчайших капелек жидкости в газе.

Проведенные предварительные исследования воспламенения образующихся гетерогенных смесей из горючего и кислорода (воздуха) могут оказаться очень интересными для техники безопасности при транспортировке газов по трубопроводам.

Возможность получения очень тонких распылов жидкостей и вязких материалов в газах может быть использована для дальнейшего исследования механизма воспламенения гетерогенных смесей.

Поступила в редакцию
9/VI 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Когарко, А. Г. Лямин, В. А. Михайлов. Химическая промышленность, 1964, 4, 35.
2. В. Е. Гордеев, В. Ф. Комов, А. И. Сербинов, Я. К. Трошин. Промышленная энергетика, 1964, 12, 24.
3. В. Е. Гордеев, В. Ф. Комов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1965, 160, 4, 853.
4. N. P. Somers. ARS Jurnal, 1961, 31, 1780.
5. J. A. Nicholls. IX-th Interu. Symposium on Combustion, 1962.
6. Л. Д. Ландау, Е. М. Либшиц. Механика сплошных сред, М., 1953.
7. А. А. Бузуков. ПМТФ, 1963, 2, 154.
8. Ю. А. Поляков. Сб. «Физическая газодинамика и свойства газов при высоких температурах». М., Наука, 1964.
9. К. А. Карпов. Таблицы функций $N(z) = t^{-z^2} \int_0^z t^{x^2} dx$ комплексной области. Изд-во АН СССР, 1958.
10. Л. Г. Гвоздева. Сб. «Физическая газодинамика». М., Наука, 1964.
11. А. А. Борисов, С. М. Когарко, А. В. Любимов. ПМТФ, 1960, 3, 175.
12. А. А. Борисов, С. М. Когарко, А. В. Любимов. Докл. АН СССР, 1963, 149, 4, 869.