

К числу труднообъяснимых вопросов, касающихся Тунгусского метеорита, относится, в частности, происхождение сил, препятствующих разлету частиц под действием электростатического поля. Не исключена возможность формирования метеорита из частиц, обладающих магнитным моментом. Масса, собранная из таких магнитных диполей, должна иметь свойства капли жидкости и иметь плотность, близкую к насыпной плотности составляющих частиц. Силовые линии будут замкнуты внутри массы.

Необходимо подчеркнуть, что Тунгусский метеорит должен был разрушаться не под действием медленно распространяющейся тепловой волны, а под действием встречного напора воздуха. При малой прочности метеоритной массы волна деформации в теле метеорита распространяется в несколько тысяч раз быстрее тепловой волны. После диспергирования пылевое облако отдает свою энергию в ударную волну на относительно коротком пути.

Таким образом, показано, что ударная волна, образованная диспергируемым метеоритом, эквивалентна точечному взрыву с энергией, равной кинетической энергии метеорита (10^{17} Дж) в точке, смещенной в направлении его начальной скорости на расстояние $\approx 50r_0$ от места входа в плотные слои атмосферы.

*Поступила в редакцию
5/II 1980*

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Кулик. Вестн. АН СССР, 1932, 11, 67.
2. Л. А. Кулик. Докл. АН СССР, 1939, 22, 8, 520.
3. Г. Ф. Плеханов. Предварительные итоги двухлетних работ комплексной самостоятельной экспедиции по изучению проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во ТГУ, 1963.
4. Н. В. Васильев, В. К. Журавлев и др. Современное состояние проблемы Тунгусского метеорита. Томск, Изд-во ТГУ, 1967.
5. А. В. Золотов. Проблема Тунгусской катастрофы. Минск, Наука и техника, 1969.
6. В. И. Вернадский. Проблемы Арктики, 1941, 5.
7. Г. И. Петров, В. П. Суслов. Земля и Вселенная, 1975, 4, 74.
8. М. А. Лаврентьев. Усп. мат. наук, 1957, 12, 4, 41.

ТУШЕНИЕ ПОЖАРОВ НА ГАЗОНЕФТЯНЫХ СКВАЖИНАХ С ПОМОЩЬЮ ВИХРЕВЫХ КОЛЕЦ

*Д. Г. Ахметов, Б. А. Луговцов, В. Ф. Тарасов
(Новосибирск)*

1. В связи с освоением нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири особое значение приобрели задачи обеспечения пожарной безопасности процессов бурения и эксплуатации скважин, а также задачи быстрой ликвидации пожаров на аварийно-фонтанирующих скважинах.

В настоящее время тушение пожаров на фонтанирующих скважинах осуществляется в основном двумя способами: с помощью мощных водных струй, направляемых под основание факела, и с помощью газовой струи, создаваемой авиационным турбореактивным двигателем [1]. Применение этих методов требует привлечения большого количества людей и специальной техники, создания больших запасов воды и проведения

длительных подготовительных работ. Доставка людей и необходимой техники к месту аварии в условиях Западной Сибири, где основным транспортным средством является авиация, требует значительных материальных затрат. Кроме того, много времени затрачивается на монтаж доставленной техники. Погодные условия в ряде случаев затрудняют использование существующих способов ликвидации пожара на скважине.

В последнее время разработаны новые высокоэффективные способы тушения пожара на фонтанирующих скважинах, главным достоинством которых является простота и возможность быстрой реализации при применении малых количеств огнетушащих средств. Эти способы основаны на воздействии на факел движущимся вдоль оси фонтана вихревым кольцом, создаваемым с помощью взрыва заряда ВВ.

Разработка этих методов является практическим выходом результатов экспериментальных и теоретических исследований турбулентных вихревых колец, ведущихся в течение нескольких лет в Институте гидродинамики СО АН СССР по инициативе М. А. Лаврентьева [2]. В настоящей работе дается качественное объяснение механизма тушения факела вихревым кольцом и приводятся результаты лабораторных, полигонных и натурных испытаний нового способа.

2. При горении струи газа, вытекающей из устья аварийно-фонтанирующей скважины, происходит диффузионное горение. В первом приближении структура факела имеет вид, изображенный на рис. 1. Химическая реакция идет в тонком слое, который можно считать поверхностью, где концентрации топлива и окислителя обращаются в ноль, а диффузионные потоки к этой поверхности находятся в стехиометрическом соотношении [3]. Эта поверхность называется фронтом пламени. Фронт начинается на некотором расстоянии от устья скважины и стабилизируется за счет изогнутого участка, положение которого определяется составом топливно-воздушной смеси на границе струи и условием равенства скорости турбулентного горения и скорости струи. При турбулентном течении, которое фактически имеет место в реальных ситуациях, изображенная картина относится к осредненному течению и положению фронта. Высота факела при пожаре на скважине достигает 80—100 м, максимальный диаметр факела — 10—15 м.

3. Возможность тушения факела с помощью вихревого кольца связана со структурой течения, возникающего при его движении. Свойства и движение вихревых колец в настоящее время достаточно изучены [2, 4—8]. В воздушной среде вихревое кольцо образуется при импульсном движении конечного объема воздуха или газа. Сформировавшееся вихревое кольцо совершает поступательное движение и проходит значительное по сравнению со своими размерами расстояние. При движении вихревого кольца вместе с ним движется некоторый объем газа — «атмосфера» вихревого кольца, имеющая форму, близкую к сплюснутому в направлении движения эллипсоиду вращения. В системе координат, связанной с вихрем, движение окружающей среды совпадает с картиной безотрывного обтекания соответствующего твердого тела.

Экспериментальные исследования поля скорости с помощью термоанемометра показали [6], что завихренность в основном сосредоточена в тороидальном ядре, поперечный размер которого мал по сравнению с размерами «атмосферы» вихревого кольца. Установлено, что максимальное значение скорости достигается на границе ядра и в несколько раз превышает величину поступательной скорости кольца.

По способу образования вихревые кольца можно делить на два типа: импульсные образуются при выталкивании



Рис. 1. Структура факела.

1 — фронт пламени; 2 — начало фронта; 3 — струя топлива.

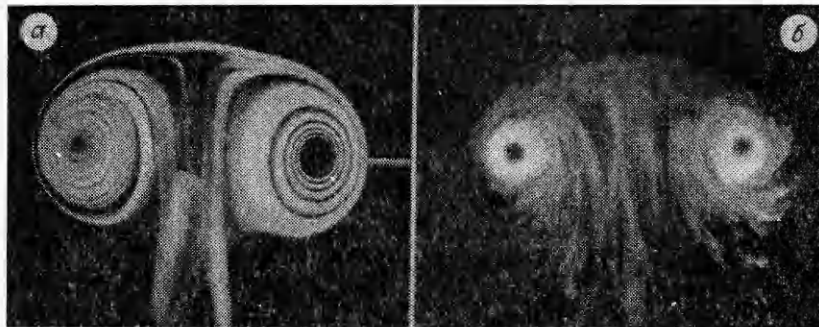


Рис. 2. Структура вихревого кольца.

порции газа (воздуха) из трубы или круглого отверстия, и всплывающие, образующиеся при подъеме компактного облака легкого газа в атмосфере. Наиболее известные примеры этих колец — дымовые кольца, пускаемые курильщиками, и всплывающее грибовидное облако при атомном взрыве. Практически импульсные вихревые кольца могут быть получены, например, при взрыве небольшого заряда ВВ, помещенного на дне цилиндрической трубы. Начальная скорость вихревого кольца при этом достигает 100 м/с, а начальный радиус кольца R получается равным 1—1,5 радиусам трубы. Общий путь, проходимый кольцом при $R = 1$ м, достигает сотен метров. Всплывающие вихревые кольца получают путем быстрого сжигания топлива или взрыва открытых зарядов ВВ. Условия, необходимые для получения вихревого кольца с заданными начальными размерами и скоростью, могут быть определены по данным экспериментальных исследований [7].

Из экспериментальных наблюдений следует, что в зависимости от величины числа Рейнольдса Re , определяемого по начальным значениям радиуса и поступательной скорости вихревого кольца, существуют два типа движения — ламинарное и турбулентное. Ламинарное вихревое кольцо, характеризующееся гладкой спиральной структурой (рис. 2, а), образуется при $Re < 10^3$. При больших значениях Re вихревое кольцо становится турбулентным (рис. 2, б).

Для тушения газонефтяных факелов наибольший интерес представляют вихревые кольца больших размеров, имеющие большую начальную скорость, т. е. турбулентные. Параметры турбулентного вихревого кольца и закон его движения могут быть определены по теоретической модели [4, 5], неплохо согласующейся с экспериментом.

4. Тушение горящего компактного фонтана осуществляется при движении вихревого кольца вдоль оси фонтана от основания факела к его вершине. Качественное объяснение механизма тушения факела состоит в следующем.

При движении вдоль факела вихревого кольца, скорость которого много больше скорости струи, фронт пламени вместе с некоторым слоем топлива обтекает «атмосферу» вихря, и при соответствующем соотношении диаметров факела и вихревого кольца этот слой деформируется в тонкую кольцевую пленку (рис. 3), в которой топливо полностью выгорает за счет увеличения градиентов концентрации, не достигая области за вихрем, где имеется свежая струя топлива. Таким образом, в этом случае вихревое кольцо фактически отрывает горящий над ним факел от источника топлива. Начавшийся процесс тушения не прерывается даже при разрушении вихревого кольца, так как лишенный топлива инертный промежуток, отделяющий факел от струи, не может существенно уменьшиться за конечный отрезок времени, необходимый для выгорания оторванного от струи факела.

Рис. 3. Схема взаимодействия вихревого кольца с факелом.
1 — фронт пламени; 2 — вихревое кольцо; 3 — газообразные продукты сгорания; 4 — струя топлива.

Следует отметить, что описанный механизм тушения справедлив как для газовой, так и для жидкой, например, нефтяной струи. В последнем случае вихрь «пропускает» через себя жидкие частицы топлива, газообразные же, которые как раз и горят, он «заставляет» обтекать себя. Отрыв пламени вихревым кольцом может произойти только в той части факела, где все топливо перейдет в газообразное состояние. В действительности на реальной фонтанирующей скважине описанный выше случай реализуется лишь на некотором расстоянии от устья скважины, а на начальном участке скорость струи может достигать величины 300—450 м/с, что значительно превышает скорость вихревого кольца, равную 50—100 м/с.

В этом случае форма «атмосферы» вихревого кольца — объема жидкости, движущегося вместе с вихрем, имеет торообразный вид. На рис. 4 изображена картина линий тока в системе координат, связанной с вихрем. При этом струя топлива проходит сквозь вихревое кольцо, причем в неподвижной системе координат скорость струи на участке *OA* превышает скорость струи в этом же сечении при отсутствии вихря. Размер «атмосферы» (заштрихованная область на рис. 4) определяется радиусом вихревого кольца и его интенсивностью — циркуляцией.

Рис. 4. Картина линий тока.
1 — фронт пламени; 2 — вихревое кольцо; 3 — струя топлива; *BC* — линия смены направления течения.

Механизм тушения факела в этом случае остается прежним, если параметры вихревого кольца таковы, что фронт пламени располагается в области правее линии *BC* и размеры «атмосферы» достаточны, чтобы при ее обтекании происходило полное выгорание смеси. Если же фронт пламени расположен левее линии *BC*, то исход процесса тушения неопределен. Здесь следует иметь в виду следующее обстоятельство. По мере продвижения вихревого кольца вверх вдоль оси факела скорость струи падает, в то время как скорость вихревого кольца уменьшается несущественно. Вследствие этого размер «атмосферы» вихря увеличивается в сторону оси струи. И если результирующая скорость течения, создаваемого вихревым кольцом и струей, превышает вдоль линии *AO* турбулентную скорость горения, то начало фронта пламени будет сноситься вверх до тех пор, пока «атмосфера» не увеличится до такой степени, что фронт пламени окажется правее линии *BC*, после чего вступает в силу описанный выше механизм тушения. Однако если интенсивность вихревого кольца и, следовательно, его скорость окажутся недостаточными, а размеры вихря будут таковы, что фронт пламени по-прежнему будет находиться левее линии *BC*, то по мере подъема вверх и падения скорости в струе может наступить момент, когда скорость турбулентного горения превысит значение скорости струи вместе с добавочной скоростью вихря и произойдет проскок фронта пламени.

Таким образом для тушения факела необходимо, чтобы скорость вихревого кольца была порядка скорости турбулентного горения, а его диаметр — порядка максимального диаметра факела.

В настоящее время точно рассчитать скорость турбулентного горения w_t не представляется возможным. Однако грубые оценки показывают, что значение w_t порядка пульсационных скоростей струи [3], величина кото-

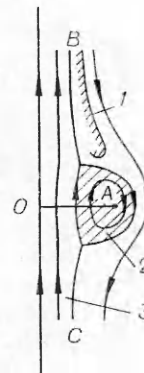




Рис. 5. Этапы тушения пропанового факела.

рых пропорциональна осевой скорости струи u_m . Из экспериментальных данных [9] следует, что максимальное значение среднеквадратичных пульсаций продольной компоненты скорости составляет $0,2u_m$. Принимая в первом приближении эту величину за скорость турбулентного горения, можно считать, что максимальная скорость распространения пламени навстречу фонтанирующей со скоростью $300\text{--}450$ м/с струе газа будет порядка 50 м/с.

Для тушения таких высокоскоростных газовых факелов могут быть эффективно использованы импульсные вихревые кольца, обладающие начальной скоростью $50\text{--}100$ м/с. С практической точки зрения более привлекательны для тушения пожаров на скважине сравнительно низкоскоростные, всплывающие вихревые кольца, поскольку они могут быть получены проще, без применения специальных устройств и конструкций. Однако при этом необходимо ликвидировать проскок пламени через вихревое кольцо. Для решения этой задачи предложено воспользоваться способностью вихревого кольца переносить распыленную примесь, например огнетушащий порошок. Введение огнетушащего порошка в пламя даже в небольших количествах может существенно снизить скорость протекания реакции горения и распространения пламени [10]. Образующийся при движении вихревого кольца спутный след, содержащий порошок, охватывает факел с боков и предотвращает возможность его повторного воспламенения. Такое комплексное воздействие на факел существенно повышает эффективность тушения.

5. Приведем некоторые результаты экспериментальных исследований по тушению факела вихревым кольцом.

Большая часть опытов проводилась с факелами, получаемыми при фонтанировании конденсированного пропана из вертикально установленной трубы, имитирующей скважину. Пропан выдавливается из резервуара давлением собственных паров, равным в условиях эксперимента $0,4\text{--}0,5$ МПа. Расход фонтана определялся по измерениям уровня конденсата в резервуаре с помощью емкостного датчика. Расход топлива варьировался в диапазоне $0,013\text{--}5,2$ кг/с. Факел с расходом $0,013$ кг/с (высота факела $H_f = 2$ м, максимальный диаметр $D_f = 0,3$ м) тушился с помощью вихревого кольца, получаемого при выталкивании порции воздуха из ящика с отверстием $0,1$ м. Начальная скорость и диаметр вихревого кольца равнялись соответственно 6 м/с и $0,14$ м. Горящий фонтан с расходом $0,065$ кг/с ($H_f = 6$ м, $D_f = 1$ м) тушился вихревым кольцом с начальной скоростью 60 м/с и диаметром $0,3$ м.

Тушение больших факелов с целью установления принципов моделирования при изменении масштаба явления производилось на специально оборудованном полигоне. Факел с $H_f = 27$ м и $D_f = 3,4$ м и получался

при поджигании пропанового фонтана с расходом 5,2 кг/с. Таким образом, масштаб фонтана по расходу увеличен по сравнению с лабораторными в 80 раз. Тушение осуществлялось вихревым кольцом, образующимся при взрыве заряда, расположенного на дне отрезка цилиндрической трубы, установленной соосно фонтану. При массе заряда 0,3 кг начальная скорость вихревого кольца, которым тушился факел, равнялась 60 м/с, а его диаметр ~3 м.

Последовательные этапы тушения этого факела по мере движения вихревого кольца вдоль оси фонтана приведены на рис. 5. Кинопрограммы показывают, что при достижении примерно 1/3 высоты факела вихрь разрушался, однако к этому моменту верхняя горячая часть факела была уже оторвана от подпитывающей струи и в дальнейшем догорала, не поджигая фонтан. Тушение этого же факела всплывающим вихревым кольцом с начальной скоростью 12 м/с и диаметром 4 м показало, что вихревое кольцо тушит факел до середины его высоты, но затем из-за малости скоростей внутри вихревого кольца происходит проскок пламени через вихрь и нижняя уже потушенная часть струи вновь поджигается. Этот нежелательный эффект устранен путем заполнения вихревого кольца распыленным огнетушащим порошком.

В результате экспериментальных исследований установлены основные принципы расчета средств, необходимых для тушения произвольного факела. На рис. 6 показана эмпирическая зависимость диаметра импульсного вихревого кольца D_v , тушащего факел, от максимального диаметра факела D_f . Область тушащих значений диаметра вихревого кольца лежит выше проведенной из начала координат прямой.

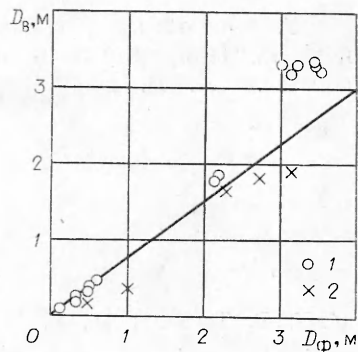


Рис. 6. Зависимость D_v от $D_{ср}$. 1 — факел погас; 2 — факел горит.



Рис. 7. Тушение нефтяного факела.

Натурные испытания предложенного способа подтвердили высокую эффективность метода. Горящий фонтан при расходе нефти 6100 т в сутки погашен с использованием всего 6 кг взрывчатого вещества и 470 кг огнетушащего порошка. Фрагменты тушения нефтяного фонтана представлены на рис. 7. На последнем кадре факел потушен, из скважины фонтанирует негорящая нефть.

Можно ожидать, что практическое применение разработанных способов приведет к существенному сокращению сроков тушения пожаров и даст значительную экономию средств.

Авторы выражают благодарность В. А. Малетину, Б. А. Миронову и Н. Е. Чернухину за помощь в проведении полигонных экспериментов, а также А. В. Вязниковцеву за организацию натуральных испытаний.

Поступила в редакцию
8/IV 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. К. В. Ткаченко, В. П. Сомов и др. Авт. свид. № 237772. Бюл. изобретений, 1969, 9.
2. М. А. Лаврентьев, Б. В. Шабат. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М., Наука, 1973.
3. Л. А. Вулис, Ш. А. Ершов, Л. П. Ярин. Основы теории газового факела. Л., Энергия, 1968.
4. А. А. Луговцов, Б. А. Луговцов, В. Ф. Тарасов.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 3. Новосибирск, 1969.
5. Б. А. Луговцов.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 38. Новосибирск, 1979.
6. Д. Г. Ахметов, О. П. Кисаров. ПМТФ, 1966, 4.
7. В. Ф. Тарасов.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 14, Новосибирск, 1973.
8. В. Ф. Тарасов.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 23. Новосибирск, 1975.
9. Г. Н. Абрамович. Теория турбулентных струй. М., Физматгиз, 1960.
10. Г. Шрайбер, П. Порст. Огнетушащие средства. М., Стройиздат, 1975.

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ЖИДКОСТИ С ПУЗЫРЬКАМИ ГАЗА

В. К. Кедринский
(Новосибирск)

В работе на основе экспериментальных исследований, выполненных в Институте гидродинамики СО АН СССР в середине 60-х годов, дан анализ механизма трансформации энергии ударных волн по мере их распространения в жидкости с пузырьками газа. Особенности этого процесса обусловлены неравновесностью по давлению для жидкой и газовой фаз, сложным характером поглощения и переизлучения двухфазной среды энергии ударной волны [1]. Они наглядно проявляются как в случае коротких ударных волн (достаточно произвольной интенсивности), так и при исследовании длинных волн с крутым фронтом, если речь идет об относительно продолжительном релаксационном процессе, малых исходных объемных концентрациях газа в среде и существенно нелинейных пульсациях пузырьков. Под короткими здесь подразумеваются такие волны, действие которых вызывает схлопывание пузырьков за время, равное или большее длительности положительной фазы волны.

Принципиально другие эффекты наблюдаются при распространении ударных волн в смесях с высоким (десять процентов) газосодержанием и с малыми временами релаксации, т. е. достаточно быстрым установлением соответствия давления в пузырьках среднему давлению в жидкой фазе, а их переносной скорости — средней массовой скорости жидкости. Они встречаются также при взаимодействии ударных волн большой интенсивности и длительности с пузырьками газа, включая их растворение. Результаты экспериментальных и численных исследований волновых процессов в таких смесях [2, 3] не содержат упомянутых выше особенностей взаимодействия «волна — среда» и определяются в основном ус-