

УДК 622.691; 533.6

А.Ф. Максименко<sup>1</sup>, e-mail: maf@gubkin.ru; А.С. Кузнециков<sup>1</sup>, e-mail: kas@gubkin.ru

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» (Москва, Россия).

## Исследование ударно-волновых процессов в каналах систем сброса и утилизации газа с учетом структурных особенностей технологических коммуникаций газотранспортных систем

В статье рассматриваются структурные особенности технологических коммуникаций газотранспортных систем. Предлагается выбор вариантов расчетных схем систем сброса и утилизации газа для решения основных задач газодинамического исследования ударно-волновых процессов в каналах систем сброса и утилизации газа. Выбор расчетных схем позволит упростить задачу газодинамического исследования ударно-волновых процессов в трубопроводах. Решение данной задачи дает ответ на вопрос о возможности формирования ударных волн большой интенсивности для существующих и перспективных режимов функционирования газотранспортных систем при аварийном сбросе природного газа из технологических коммуникаций через сбросовые трубопроводы системы сброса и утилизации газа. Первый базовый вариант предлагаемых расчетных схем отличается особенностью подсоединения систем сброса и утилизации газа к общей коммуникации аппаратов и трубопроводов компрессорных станций. Особенностью второго базового варианта является подсоединение трубопроводного ответвления системы сброса и утилизации газа к аппарату высокого давления значительного объема (пылеуловитель, фильтр-сепаратор, аппарат воздушного охлаждения и др.). Приведены схемы для различных стадий процесса распространения ударной волны в трубопроводе. Рассмотрена и принята для расчетов в качестве «высоконапорного газа» и «низконапорного газа» возможная модель рабочей смеси (гетерогенная двухфазная смесь, химически инертная, без учета массового обмена между фазами). Предложены рекомендации для выбора параметров высоконапорного и низконапорного газов для повышения степени достоверности результатов аналитических расчетов, позволяющих выполнить математическое описание изучаемых ударно-волновых процессов и решить поставленные задачи.

**Ключевые слова:** система сброса и утилизации газа, газовая динамика, ударно-волновой процесс, трубопроводная система, расчетная схема, газодинамическое исследование.

.....

A.F. Maksimenko<sup>1</sup>, e-mail: maf@gubkin.ru; A.S. Kuznechikov<sup>1</sup>, e-mail: kas@gubkin.ru

<sup>1</sup> Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University)" (Moscow, Russia).

## Research of Shock and Wave Processes in Channels of Systems of Dumping and Utilization of Gas Taking into Account Structural Features of Technological Communications of Gas Transmission Systems

In this work structural features of technological communications of gas transmission systems are considered and the choice of versions of settlement schemes of systems of dumping and utilization of gas for the solution of the main objectives of a gasdynamic research of shock and wave processes in channels of systems of dumping and utilization of gas is offered. The choice of settlement schemes will allow to simplify a problem of a gasdynamic research of shock and wave processes in pipelines which solution will give further the answer to a question of a possibility of formation of shock waves of big intensity at emergency dumping of natural gas from technological communications of gas transmission systems for existing (or perspective) of the modes of their functioning via waste pipelines of system of dumping and utilization of gas. In the offered versions of settlement schemes the first basic option differs in feature of connection of systems of dumping and utilization of gas to the general communication of devices and pipelines of compressor stations, feature of the second basic option is connection of a pipeline branch of system of dumping and utilization of gas to the technological device – the high-pressure apparatus of considerable volume (the dust collector, the filter separator, the air cooler, etc.). Schemes for various stages of process of distribution of a shock wave are provided in the pipeline. The possible model of working

mix is also considered and accepted for calculations as “high-pressure gas” and “low-pressure gas” (heterogeneous two-phase mix, chemically inert, without mass exchange between phases). Recommendations for the choice of parameters of high-pressure and low-pressure gases for increase in degree of reliability of results of the analytical calculations allowing to execute the mathematical description of the studied shock and wave processes and the solution of objectives are offered.

**Keywords:** gas discharge and utilization system, gas dynamics, shock wave process, pipeline system, design scheme, gas dynamic analysis.

### ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для аналитического описания ударно-волновых процессов целесообразно использовать хорошо зарекомендовавшие себя в теории ударных труб асимптотические методы. Необходимо построить расчетные схемы распространения ударной волны и сопутствующих течений, соответствующие различным режимам, обусловленные особенностями структуры этих течений, зависящих от физических свойств и начальных состояний высоконапорного и низконапорного газов, условий соединения канала системы сброса и утилизации газа (СУГ) с основными структурными технологическими элементами рассматриваемого объекта, конфигурации канала системы СУГ и характера работы пускового устройства. Необходимо также выполнить математическое описание изучаемых ударно-волновых процессов для каждого режима течения и определить условия его реализации. Для этого целесообразно использовать основные уравнения для нестационарного потока за фронтом головной ударной волны и соотношения, выполняющиеся на ударном фронте и контактной поверхности (поверхности раздела между потоками высоконапорного и низконапорного газа). Важной задачей является определение и численная оценка интенсивности ударной волны для режима форсированного сброса высоконапорного газа. Соответствующие математические модели для расчета интенсивности ударной волны связаны с условиями возможной схематизации форсированного сброса и допущениями о развитии процесса.

Помимо расчета интенсивности головной ударной волны представляет практический интерес определение параметров потоков (в частности, температурных режимов) возмущенных высоконапорных и низконапорных газов. Знание интенсивности ударной волны и температурных параметров сопутствующих течений необходимо для оценки динамических нагрузок и явлений типа теплового удара, воспринимаемых внутренней поверхностью канала системы СУГ, что существенно для последующего прогнозирования эксплуатационной надежности элементов системы СУГ, предназначенной для многократного использования.

Кроме того, представляет интерес изучение пропускной способности канала системы СУГ при сбросе высоконапорного газа. От решения этой задачи зависит оценка скорости эвакуации высоконапорного газа из основных элементов коммуникаций компрессорной станции и степень их освобождения от природного газа, что связано с прямым назначением систем СУГ, включая возможность предотвращения и развития аварий.

Необходимо аналитически, в рамках применяемых математических моделей для расчета ударно-волновых процессов, определить совокупность основных факторов, управляющих величиной интенсивности ударной волны и пропускной способности трубопровода системы СУГ. В частности, требуется выяснить условия, способствующие снижению интенсивности ударной волны.

Далее должны быть предложены рекомендации для выбора исходных термодинамических параметров высо-

конапорного и низконапорного газов для повышения степени достоверности результатов аналитических расчетов по сравнению с более трудоемким графоаналитическим методом, отражающим изменения реальных теплофизических свойств сбрасываемого газа.

Математические модели ударно-волновых процессов и рекомендации по их расчету должны быть дополнены соответствующими примерами численной реализации для типичных ситуаций сброса природного газа.

Приоритетным в целевом назначении разработок, приведенных в данной работе, является получение достоверной информации о численных значениях интенсивности ударных волн, которые формируются при форсированной эвакуации природного газа через специальные трубопроводы системы СУГ, включающие как сбросовые трубопроводы, так и сборные коллекторы. Ключевым является ответ на вопрос о возможности формирования ударных волн большой интенсивности при аварийном сбросе природного газа из технологических коммуникаций газотранспортных систем для существующих (или перспективных) режимов их функционирования через сбросовые трубопроводы системы СУГ.

В прямой связи с вопросом об интенсивности ударной волны находится решение задачи о динамических (ударных) нагрузках, воспринимаемых сбросовым трубопроводом, и, как следствие, поиск мероприятий по обеспечению динамической прочности и эксплуатационной надежности системы СУГ при многократном нагружении.

Для цитирования (for citation):

Максименко А.Ф., Кузнециков А.С. Исследование ударно-волновых процессов в каналах систем сброса и утилизации газа с учетом структурных особенностей технологических коммуникаций газотранспортных систем // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2018. № 3. С. 52–60.

Maksimenko A.F., Kuznecikov A.S. Research of Shock and Wave Processes in Channels of Systems of Dumping and Utilization of Gas Taking into Account Structural Features of Technological Communications of Gas Transmission Systems. Territorija «NEFTEGAS» = Oil and Gas Territory, 2018, No. 3, P. 52–60. (In Russian)

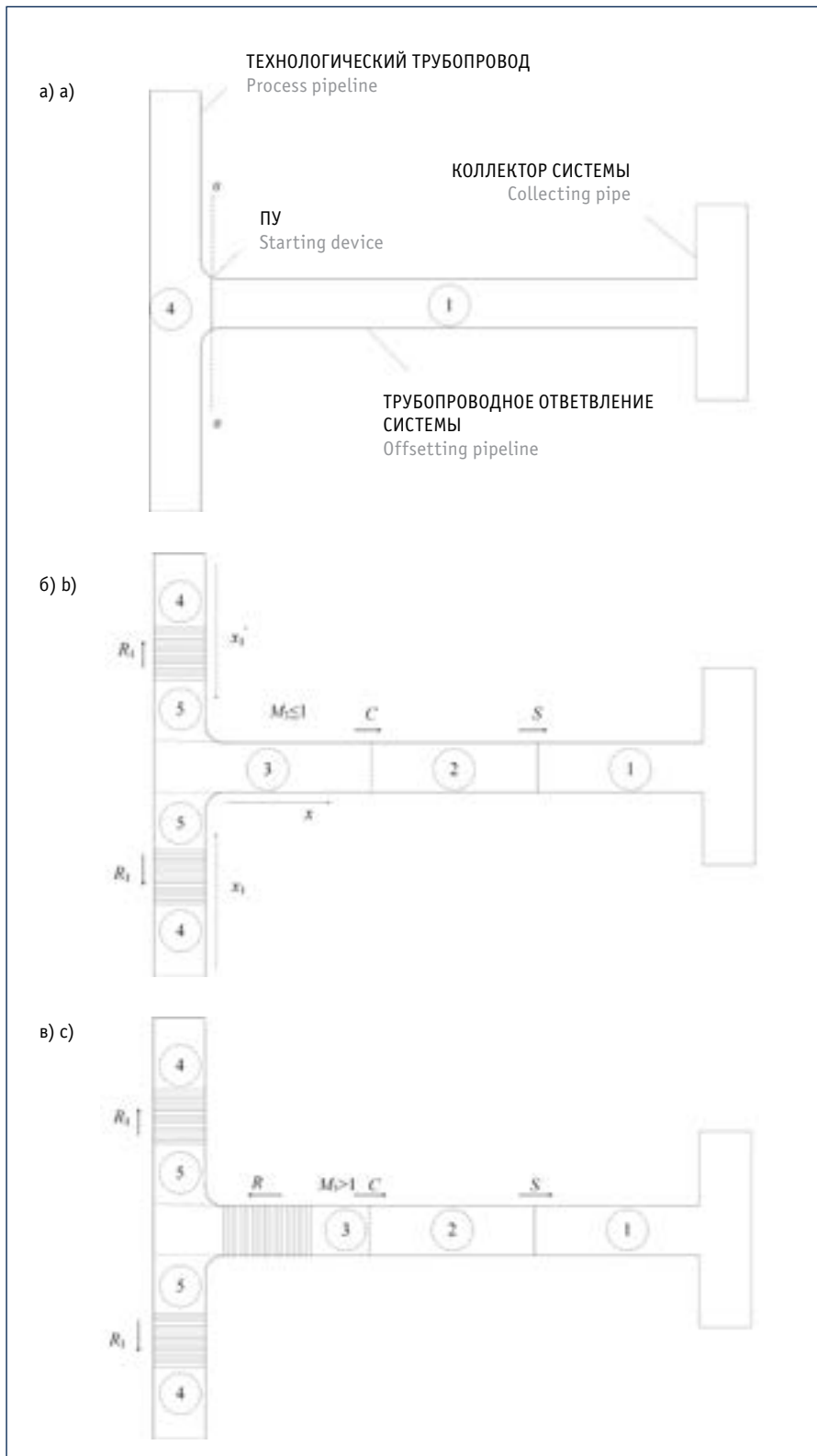


Рис. 1. Одномерные схемы, характеризующие основные режимы распространения ударной волны при аварийном сбросе газа из технологического трубопровода:

а) система до сброса газов; б) первый основной режим; в) второй основной режим

Fig. 1. One-dimensional schemes that characterize the main modes of the shock wave propagation at emergency gas dumping from a process pipeline:

а) system before gas dumping; б) first main mode; в) second main mode

При обосновании выбора диапазона изменения определяющего параметра  $P_{41}$  (отношение давлений высоконапорного и низконапорного газов) необходимо учесть возможное вакуумирование низконапорного газа во внутренних каналах системы СУГ для интенсификации ее эвакуационной способности при утилизации природного газа, а также влияние объемного содержания метана  $CH_4$  в природном газе на величину интенсивности ударной волны. Выявление возможности генерирования сильных ударных волн в сбросовом трубопроводе системы СУГ требует дополнительной информации о реализующихся температурных режимах в газовых потоках, сопутствующих распространению ударной волны, для чего необходимо разработать методические рекомендации по расчету местной температуры природного газа в потоках и провести численные расчеты значений температуры в потоках непосредственно за фронтом ударной волны и за контактной поверхностью.

### МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Для существенного снижения динамических (ударных) нагрузок на стенки трубопроводных элементов системы СУГ, предназначенной для многократного использования, в принципе возможны два варианта. Первый обеспечивает существенное снижение интенсивности генерируемой ударной волны, которое можно обеспечить путем уменьшения степени раскрытия канала пускового устройства (ПУ)  $\sigma$ , т. е. уменьшением площади поперечного сечения «горлового» участка канала. Но этот способ снижения интенсивности ударной волны имеет существенный недостаток, связанный с тем, что одновременно снижается пропускная способность сбросового трубопровода, а значит, и темп эвакуации природного газа [1].

Во втором варианте используются естественные возможности установки сборного коллектора, следующей за сбросовым трубопроводом. Площадь сечения канала сборного коллектора существенно больше, чем сбросового трубопровода, поэтому сборный коллектор играет роль расширительной камеры, снижающей интенсивность



# IX Международная конференция «Обслуживание и ремонт основных фондов ПАО «Газпром»»

24-28 сентября 2018 г.  
Республика Крым  
г. Алушта

Генеральные  
информационные  
партнеры

**ГАЗОВАЯ  
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**

**ТЕРРИТОРИЯ  
НЕФТЕГАЗ**

Тел.: +7 (495) 240-54-57  
+7 (915) 355-99-91

E-mail: [elya@neftegas.info](mailto:elya@neftegas.info)

[WWW.NEFTEGAS.INFO](http://WWW.NEFTEGAS.INFO)

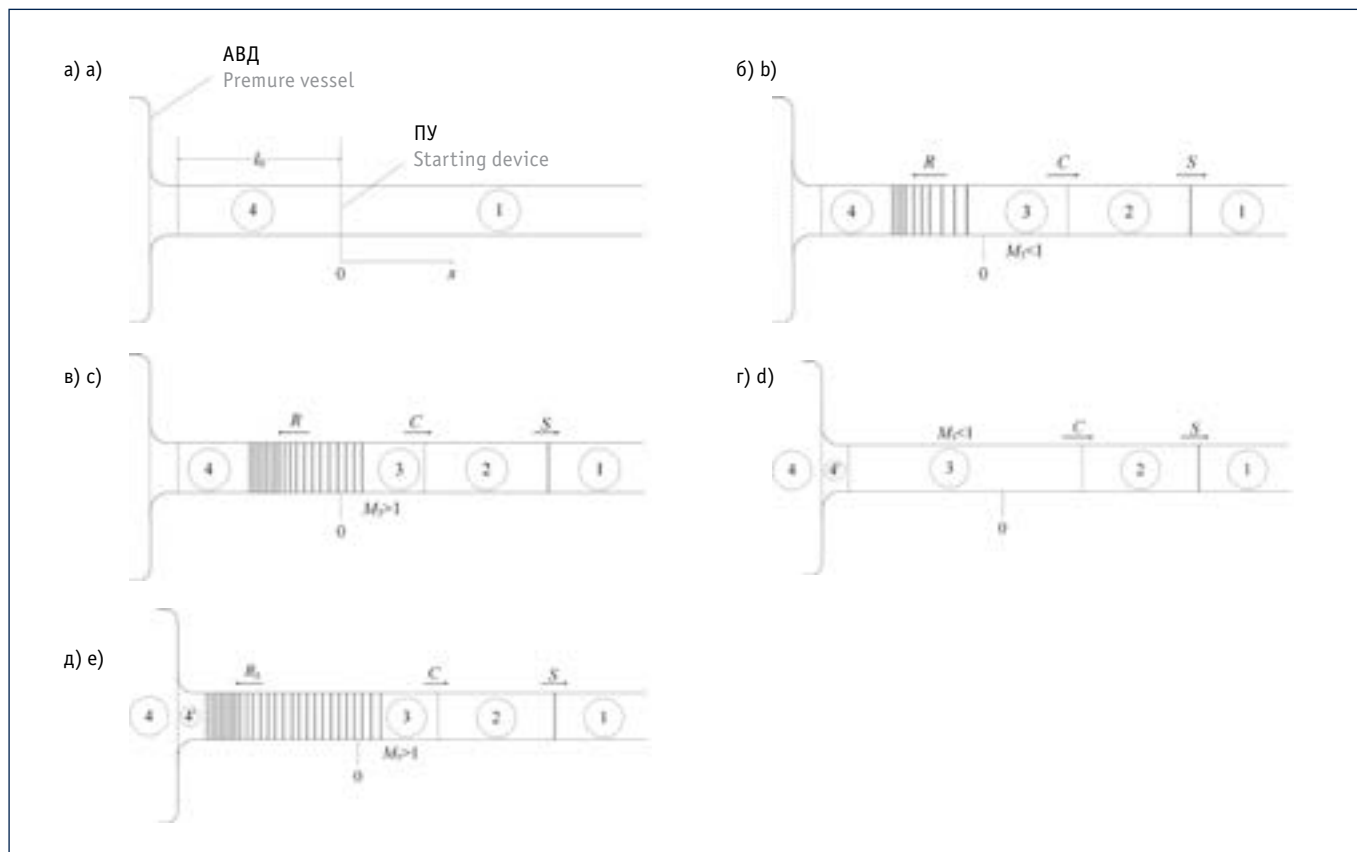


Рис. 2. Принципиальная схема подсоединения трубопроводного ответвления системы сброса и утилизации газа к аппарату высокого давления (а); одномерные схемы для начальной (б – первый и в – второй основные режимы) и предельной (г – первый и д – второй основные режимы) стадии процесса распространения ударной волны в трубопроводе

Fig. 2. The schematic diagram of connection of the offsetting pipeline of the gas dumping and utilization system to the premure vessel (a); one-dimensional schemes for initial (b – first and c – second main modes) and limiting (d – first and e – second main modes) stages of the shock wave propagation in the pipeline

исходной ударной волны. Сборный коллектор представляет собой своего рода «гаситель» ударной волны. Можно оценить его «гасительные» способности при помощи вычислений, используя одномерные расчетные схемы для описания развития последующего ударно-волнового процесса, связанного с переходом ударной волны из сбросового трубопровода в канал сборного коллектора. Влияние теплофизических свойств «низконапорного» газа следует учитывать выбором показателя адиабаты.

По результатам численных расчетов необходимо построить диаграммы зависимости  $P_{51} = P_{51}(P_{21}, \sigma)$  для определения условий реализации каждого режима в отдельности, что даст возможность количественно оценить «гасительную» способность сборного коллектора для широкого диапазона изменений вели-

чин  $P_{21}$  и  $\sigma$  ( $0 \leq \sigma \leq 1$ ), включая предельную ситуацию вырождения прошедшей ударной волны в звуковое возмущение ( $P_{51} \rightarrow 1$ ).

**ВАРИАНТЫ ОБОБЩЕННЫХ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ**

Учитывая структурные особенности технологических коммуникаций газотранспортных систем (рис. 1, 2), можно предложить два базовых варианта обобщенных расчетных схем систем СУГ. По своему композиционному исполнению и функциональному назначению системы СУГ являются трубопроводными обвязками второго иерархического уровня (специального назначения) в общей коммуникации технологических аппаратов и трубопроводных сетей КС [2].

Первый базовый вариант (рис. 1а) отличается особенностью подсоединения

систем СУГ к общей коммуникации аппаратов и трубопроводов компрессорной станции. Сбросовый канал трубопроводного ответвления системы СУГ подсоединен в рассматриваемом случае с помощью ПУ к участку технологического трубопровода в системе коммуникаций компрессорной станции, по которому осуществляется компримирование природного газа в канале 4.

Сечение 0–0 трубопроводного ответвления системы СУГ, как показано на схеме (рис. 1а), соответствует положению ПУ (предохранительная арматура, специальный клапан, в частности, использующий разделительную мембрану). Согласно схеме ПУ может находиться в непосредственной близости к технологическому трубопроводу, но может и отстоять от него на некотором расстоянии  $l_0$  вправо по трубопроводному ответвлению.



X Международная научно-практическая конференция  
**ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СТАНЦИИ  
И СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ**

22–26 октября 2018 г., Алтайский край



**ГАЗОВАЯ  
ПРОМЫШЛЕННОСТЬ**

**ТЕРРИТОРИЯ  
НЕФТЕГАЗ**

Тел.: +7 (495) 240-54-57/+7 (915) 355-99-91

E-mail: [elya@neftegas.info](mailto:elya@neftegas.info)

[WWW.NEFTEGAS.INFO](http://WWW.NEFTEGAS.INFO)

**Количество участников ограничено**

Участок канала справа от ПУ до его срабатывания, т. е. до сброса газа, заполнен неподвижным «низконапорным» газом, физические свойства которого, вообще говоря, отличны от сжимаемого природного. При сбросе «высоконапорный» газ вытесняет низконапорный и развивается ударно-волновой процесс. Давление невозмущенного «низконапорного» газа  $P_1$  всегда меньше  $P_4$  – давления сжимаемого газа в области 4. Трубопроводное ответвление системы СУГ в общем случае соединено с коллектором (рис. 1), который, в свою очередь, связан с аккумулирующими емкостями (сборные резервуары) для сбора природного газа. Отметим, что степень раскрытия соединительного канала ПУ при сбросе газа влияет в итоге на интенсивность ударной волны и пропускную способность канала системы СУГ, т. е. на темпы эвакуации природного газа. Рассматриваемая схема системы СУГ может в ряде случаев быть распространена и на магистральный газопровод [3].

Особенностью второго базового варианта (рис. 2а) является подсоединение трубопроводного ответвления системы СУГ к технологическому аппарату – аппарату высокого давления (АВД) значительного объема (пылеуловитель, фильтр-сепаратор, аппарат воздушного охлаждения и др.). В общем случае ПУ (сечение 0–0) отстоит от АВД на расстоянии  $l_0$ . В частном случае  $l_0 = 0$ . До сброса высоконапорного газа слева от сечения 0–0 внутреннее пространство 4 участка сбросового трубопровода и АВД заполнено природным газом («высоконапорный» газ). Справа от ПУ пространство 1 трубопроводного ответвления заполнено неподвижным «низконапорным» газом (не обязательно природным) низкого давления ( $P_4 > P_1$ ). Сбросовой канал системы СУГ может быть подсоединен к коллектору, связанному с аккумулирующей емкостью (сборным резервуаром) для утилизации природного газа. При открытии соединительного канала ПУ происходит сброс «высоконапорного» газа, вытесняющего «низконапорный» газ с распространением ударной волны.

В общем случае реальная рабочая сжимаемая среда (природный газ)

представляет собой смесь газов с твердыми и жидкими частицами, причем доминирующим по своей массовой доле газом является метан  $CH_4$ . Поэтому в качестве модели рабочей смеси «высоконапорного» газа рассматривается гетерогенная двухфазная смесь, которую считаем химически инертной, без учета массового обмена между фазами. Состав «высоконапорного» газа считаем, таким образом, «замороженным». Гетерогенную смесь считаем также однородной. Поэтому  $f$  – массовая доля газообразных компонентов в гетерогенной смеси – остается постоянной ( $f = const$ ).

Предположим, что частицы (твердые и жидкие включения) имеют достаточно малые размеры, причем все фазы (газообразная, твердая и жидкая) находятся при сжатии рабочей среды в кинематическом и тепловом равновесии (равенство скоростей  $u_g = u_s = u$ , а также температур  $T_g = T_s = T$ , где индекс  $g$  относится к газовой фазе,  $s$  – к частицам). Примем также, что частицы не оказывают сколько-нибудь заметного влияния на давление в газовом потоке. Следовательно, давление рабочей среды определяется исключительно давлением газообразной фазы ( $P_g = P$ ). В соответствии с указанными допущениями имеем:  $u_g = u_s = u$ ,  $T_g = T_s = T$ ,  $f = const$ ,  $P_g = P$ .

Примем далее в качестве основного теплофизического условия допущение, что гетерогенная смесь представляет собой смесь совершенных газообразных компонентов и частиц с постоянной средней массовой плотностью  $\rho_s$  и удельной теплоемкостью  $c_s$ .

То есть в первом приближении газовые компоненты смеси являются идеальными газами с постоянными удельными теплоемкостями. Тогда уравнение состояния для смеси газообразных компонентов запишется в виде:

$$P = \rho_g \frac{R}{\mu} T, \quad (1)$$

где  $\rho_g$  – средняя массовая плотность смеси газообразных компонентов,  $кг/м^3$ ;  $P$  – давление, Па;  $T$  – температура,  $^{\circ}C$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\mu$  – молекулярный вес, совпадающий численно с мольной массой смеси газообразных компонентов.

Суммарный удельный объем для гетерогенной смеси будет равен сумме объемов, занимаемых отдельными фазами. Поэтому связь между характерными массовыми плотностями:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{f}{\rho_g} + \frac{(1-f)}{\rho_s}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – массовая плотность гетерогенной смеси,  $кг/м^3$ ;  $f$  – массовая доля газообразных компонентов, %;  $(1-f)$  – массовая доля инородных включений – частиц, %.

На основании (1) и (2) запишем уравнение состояния гетерогенной смеси в виде

$$P = \frac{\rho f R T}{\mu \left[ 1 - (1-f) \frac{\rho}{\rho_s} \right]}. \quad (3)$$

Воспользуемся соотношениями, которые являются следствиями первого и второго начал термодинамики. Тогда, опуская выражения для химического потенциала вследствие химической инертности рабочей среды, используя (3), получим калорическое уравнение состояния (связывающее  $P$ ,  $\rho$  и  $s$  – удельную энтропию гетерогенной смеси):

$$\frac{P}{P_0} = \left\{ \frac{\left[ \frac{\rho}{1 - (1-f) \frac{\rho}{\rho_s}} \right]^{\gamma}}{\frac{\rho_0}{1 - (1-f) \frac{\rho_0}{\rho_s}}} \right\}^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (4)$$

где индекс (0) относится к некоторому начальному состоянию рабочей среды. Для удельной энтропии

$$s = f s_g + (1-f) s_s. \quad (5)$$

Для обобщенного показателя адиабаты  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_v + \frac{fR}{\mu}}{c_v}, \quad (6)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость среды при постоянном давлении,  $Дж/(кг \cdot K)$ ;  $c_v$  – удельная теплоемкость среды при постоянном объеме,  $Дж/(кг \cdot K)$ .

Наряду с (5) удельные величины объема и внутренней энергии подчиняются соотношениям:

«Ригойл» – это современная компания, ведущая свою деятельность с 2012 года и специализирующаяся на поставке нефтепромыслового оборудования, буровых установок, комплектующих, запасных частей и инструментов от ведущих российских, китайских, индийских и европейских производителей.



- **Буровые установки:**
- **Внутрискважинное оборудование и ВЗД**
- **Трубы ГНКТ**
- **ПВО и устьевое оборудование**
- **Комплексы оборудования для ГРП**
- **Колтюбинговые установки**
- **Комплектующие и ЗиП**





$$\begin{aligned} V &= fV_g + (1-f)V_s, \\ E &= fE_g + (1-f)E_s. \end{aligned} \quad (7)$$

При выводе (4) использовались соотношения, связывающие удельную энтропию и энтальпию с удельной внутренней энергией [4]:

$$\begin{aligned} Tds &= PdV + dE, \\ i &= E + PV. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение (4) соответствует допущению, что при движении рабочей среды в канале взаимодействие потока с окружающей средой через стенки канала происходит при отсутствии теплообмена и в пренебрежении диссипативными эффектами, обусловленными вязкостью. В этом смысле можно говорить об адиабатическом характере движения среды в целом, когда «квазичастица» гетерогенной смеси сохраняет при своем движении энтропию, хотя удельная энтропия в разных точках пространства для «квазичастиц» в рассматриваемый момент времени неодинакова. Если удельная энтропия для всех «квазичастиц» гетерогенной среды не изменяется во времени и одинакова, то течение будет изоэнтропическим и выражение (4) упрощается.

В общем случае, исключая  $\rho$  в (4) с помощью (3), получим связь между  $P$ ,  $T$  и  $s$  в виде:

$$\frac{P}{P_0} = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \cdot e^{-\frac{(s-s_0)}{\frac{fR}{M}}}. \quad (9)$$

Определение  $a$  – скорости звука, м/с, осуществляем по формуле:

$$a^2 = \left( \frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{s=\text{const}} = \gamma \frac{P}{\rho \left[ 1 - \frac{(1-f)P}{\rho_s} \right]}. \quad (10)$$

В заключение покажем соотношения, связывающие  $\mu$ ,  $f$ ,  $\rho_s$ ,  $\rho_g$  с соответствующими величинами компонентов гетерогенной смеси.

Пусть  $n_g$  и  $n_s$  – числа различных компонентов газобразной, твердой или жидкой фазы. Тогда

$$\begin{aligned} f &= \sum_{j=1}^{n_g} f_{g_j}, \\ 1-f &= \sum_{j=1}^{n_s} f_{s_j}, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $f_{g_j}$  и  $f_{s_j}$  – массовые доли газобразных и твердых (жидких) компонентов с соответствующими номерами  $j$  и  $i$ .

Для величины  $\mu$  – приведенного молекулярного веса (молярной массы) смеси газобразных компонентов имеем:

$$\frac{f}{\mu} = \sum_{j=1}^{n_g} \frac{f_{g_j}}{\mu_j}. \quad (12)$$

Вместе с тем в соответствии с законом Дальтона положим, что давление сме-

си равно сумме парциальных давлений всех газобразных компонентов.

В целях общности рассмотрения целесообразно использовать аналогичную модель гетерогенной среды для «низконапорного» газа, заполняющего участок сбросового канала (справа от ПУ на рис. 1 и 2) до начала процесса сброса «высоконапорного» газа [5].

Отметим, что в качестве «низконапорного» газа можно выбрать среду, идентичную по составу газобразных компонентов «высоконапорному» газу, или же однокомпонентный нейтральный газ другого состава и с другими теплофизическими свойствами.

## ВЫВОДЫ

На примере возможных технических схем утилизации природного газа, с учетом особенностей технологической коммуникации компрессорных станций рассмотрен выбор базовых вариантов расчетных схем систем сброса и утилизации газа. Приведенные варианты расчетных схем систем сброса и утилизации газа и схемы для различных стадий процесса распространения ударной волны в трубопроводе позволят в дальнейшем рассмотреть различные задачи газодинамического исследования ударно-волновых процессов в трубопроводах.

## Литература:

1. Максименко А.Ф., Кузнециков А.С. Анализ влияния степени раскрытия канала пускового устройства на интенсивность ударной волны при сбросе высоконапорного газа из аппарата высокого давления большого объема // Нефть, газ и бизнес. 2012. № 1–2. С. 106–109.
2. Максименко А.Ф., Кузнециков А.С. Основные расчетные соотношения интенсивности ударной волны (в трубопроводных ответвлениях для одномерной расчетной схемы ударно-волнового процесса) // Нефть, газ и бизнес. 2009. № 3. С. 57–58.
3. Максименко А.Ф., Кузнециков А.С. Анализ базовых вариантов расчетных схем систем СУГ (для магистральных газопроводов) // Нефть, газ и бизнес. 2008. № 10. С. 55–56.
4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
5. Максименко А.Ф., Кузнециков А.С. Определение интенсивности ударной волны в зависимости от параметров начального состояния газовой смеси (при форсированном сбросе высоконапорной среды из технологического трубопровода) // Нефть, газ и бизнес. 2009. № 1. С. 65–67.

## References:

1. Maksimenko A.F., Kuznechikov A.S. Analysis of the Influence of the Degree of Opening of the Launching Device's Channel on the Intensity of the Shock Wave when a High-Pressure Gas is Discharged from a High-Pressure Apparatus of a Large Volume. *Neft', gaz i biznes = Oil, Gas and Business*, 2012, No. 1–2, P. 106–109. (In Russian)
2. Maksimenko A.F., Kuznechikov A.S. Basic Calculation Relationships for Determining the Intensity of the Shock Wave (in Pipeline Branches for a One-Dimensional Design Scheme of the Shock-Wave Process). *Neft', gaz i biznes = Oil, Gas and Business*, 2009, No. 3, P. 57–58. (In Russian)
3. Maksimenko A.F., Kuznechikov A.S. Analysis of Basic Options for Design Schemes for Natural Gas Discharge and Utilization Systems (for Gas-Main Pipelines). *Neft', gaz i biznes = Oil, Gas and Business*, 2008, No. 10, P. 55–56. (In Russian)
4. Loitsyansky L.G. *Mechanics of Fluid and Gas*. Moscow, Drofa, 2003, 840 p. (In Russian)
5. Maksimenko A.F., Kuznechikov A.S. Determination of the Intensity of the Shock Wave as a Function of the Parameters of the Initial State of the Gas Mixture (with Forced Discharge of a High-Pressure Fluid from the Process Pipeline). *Neft', gaz i biznes = Oil, Gas and Business*, 2009, No. 1, p. 65–67. (In Russian)