

**А.Б.НЕЗАМЕТДИНОВ**, канд. техн. наук, доцент, *nab4@mail.ru*

**М.Г.МЕНЖУЛИН**, д-р техн. наук, профессор

**С.В.ХОХЛОВ**, канд. техн. наук, доцент, (812) 328 86 46

**П.В.ШИШКИН**, канд. техн. наук, доцент

*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург*

**A.B.NEZAMETDINOV**, PhD in eng. sc., associate professor, *nab4@mail.ru*

**M.G.MENZHULIN**, Dr. in eng. sc., professor

**S.V.KHOKHLOV**, PhD in eng. sc., associate professor, (812) 328 86 46

**P.V.SHISHKIN**, PhD in eng. sc., associate professor

*National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg*

## **ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ГАЗА ВНУТРИ ОБЪЕМНОГО НАСОСА ВЗРЫВНОГО ТИПА**

Параметры взрыва газа и детонационных волн в газовых системах на границе между взрывными газами и жидкостью для разных граничных условий определялись для идеального газа в замкнутом объеме с жесткими стенками. Рассмотрены примеры взрыва горючей смеси метана с воздухом при полном и неполном окислении метана.

**Ключевые слова:** объемный насос, камера, давление, взрыв метана, концентрация кислорода.

## **EVALUATION OF GAS PARAMETERS IN EXPLOSIVE TYPE DISPLACEMENT PUMPS**

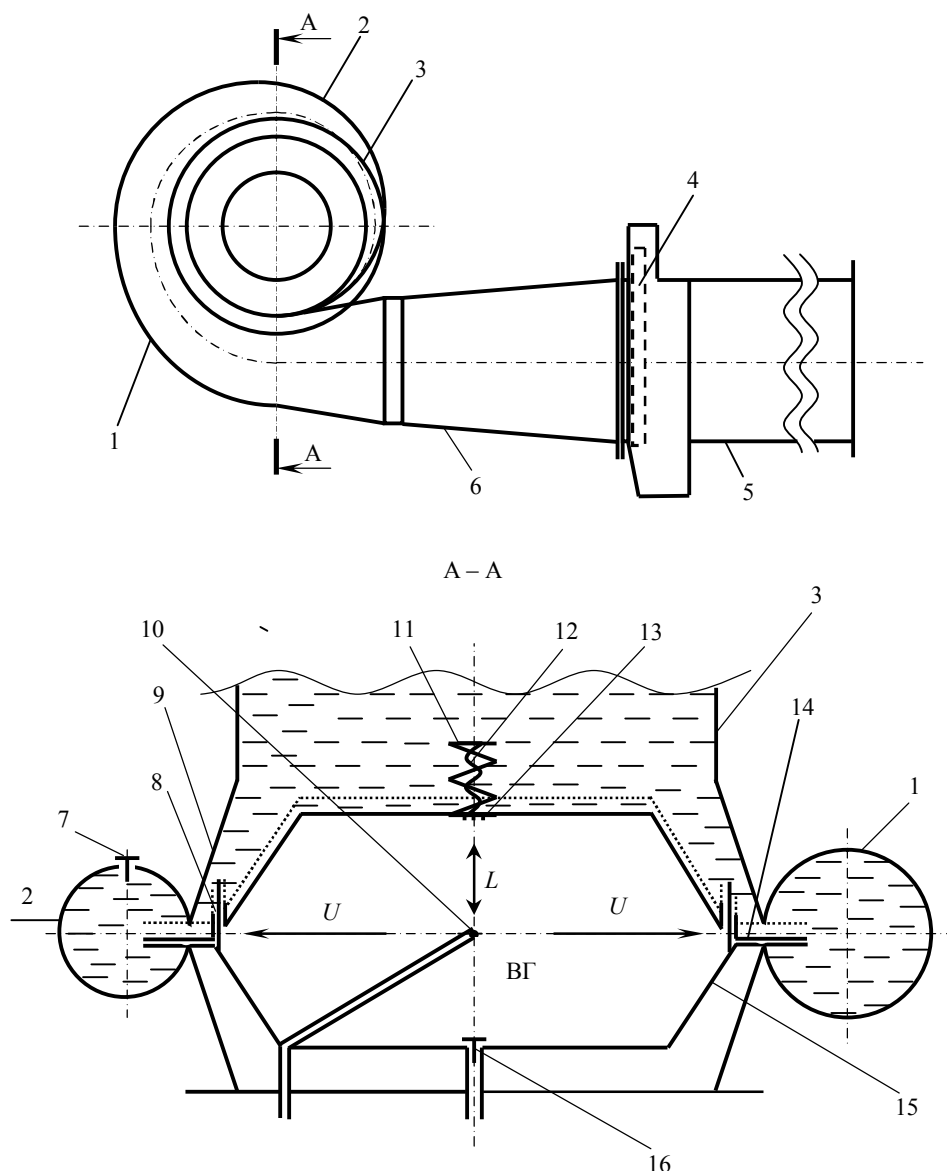
Gas explosion and detonated waves parameters were determined for an ideal gas in an enclosed volume with rigid walls in gas systems on the border between explosive gases and liquids for different boundary conditions. Examples of the explosion of the combustible mixture of methane and air, with full and partial oxidation of methane have been considered.

**Key words:** displacement pump, chamber, pressure, methane explosion, oxygen concentration.

В настоящее время вопросам разработки объемных насосов для перекачивания большого количества жидкости и смесей с больших глубин уделяется повышенное внимание. В данной работе рассматривается объемный насос взрывного типа со спиралевидным корпусом (см. рисунок) [2].

Перекачиваемая суспензия под действием собственного веса через центральный всасывающий патрубок 3 заполняет полость спирального отвода 1, 2. Через впускной канал 16 в рабочую камеру подается под давлением топливно-воздушная смесь; при

достижении в рабочей камере, образованной тарельчатым верхним диском 13 и нижним тарельчатым диском камеры 15, давления 0,6-0,8 МПа, прекращается подача смеси и с помощью свечи зажигания 10 производится ее воспламенение. В результате взрыва в рабочей камере резко повышается давление. Под действием высоконапорной продольной волны тарельчатый клапан 14, поднимаясь вверх по направляющим 8, сжимая пружину 11, расположенную на геликоидальном стержне 12, прижимается к корпусу насоса 9 и перекрывает всасывающий патрубок 3



Объемный насос взрывного типа со спиралевидным корпусом

с несущей жидкостью. Газ от взрыва, расширяясь, выбрасывается в спиральный отвод 1 и 2. Суспензия, находящаяся в спиральном отводе, газами направляется на заслонку 4, которая под действием давления перемещается, вращаясь на другом геликоидальном стержне, и открывает выход для движения суспензии и газа через нагнетательный патрубок 6 в магистральный трубопровод 5. Давление в рабочей камере падает, пружина 11 возвращает верхний всасывающий клапан 14 и заслонку 4 в исходное положение, открывается всасывающий патрубок 3 и суспензия заполняет спиральный отвод 1 и 2.

Продукты сгорания выбрасываются в окружающую среду через клапан 7.

Для перекачивания жидкости на уровень с большими геодезическими отметками необходима разработка методов расчета параметров взрыва в газовых системах на границе между взорванными газами и жидкостью или смесью. В настоящее время такие расчеты выполнить затруднительно, поэтому в работе рассматриваются методы расчета взрывааемых газов в замкнутом объеме с жесткими стенками: объемного взрыва идеального газа; термодинамических параметров газов при взрыве в замкнутом объеме;

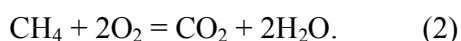
преломления давления из объема камеры насоса в объем спиралевидного насоса, заполненного транспортируемой жидкостью.

Давление смеси метана с воздухом в замкнутом объеме зависит от температуры взрыва и отношения числа молекул продуктов горения к числу молекул во взрывчатой смеси. Для расчета давления взрыва воспользуемся формулой

$$P_{\text{в}} = P_0 \frac{T_{\text{в}}}{T_0} \frac{m}{n}, \quad (1)$$

где  $T_0$  – начальная температура смеси, К;  $T_{\text{в}}$  – температура взрыва газа, К (в нашем случае в качестве температуры взрыва принимаем теоретическую температуру горения при постоянном объеме  $T_{\text{в}}$ );  $P_0$ ,  $P_{\text{в}}$  – начальное давление смеси и давление взрыва, МПа;  $m$ ,  $n$  – соответственно число молекул в химической формуле исходной взрывчатой смеси и продуктов взрыва.

Уравнение реакции горения метана при полном окислении газа



Теоретическую температуру горения можно рассчитать с помощью уравнения теплового баланса, учитывая удельную теплоемкость и объемы углекислого газа и водяного пара:

$$T_{\text{в}} = T_{\text{н}} + \frac{Q}{(V_{\text{CO}_2} C_{V_{\text{CO}_2}} + V_{\text{H}_2\text{O}} C_{V_{\text{H}_2\text{O}}})}, \quad (3)$$

где  $Q$  – теплота горения метана (теплотворная способность), кДж/кг;  $V_{\text{CO}_2} = 1,17 \text{ м}^3$ ,  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 2,8 \text{ м}^3$  – объем продуктов сгорания соответственно углекислого газа и водяного пара, образующихся при горении 1 кг метана,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $C_{V_{\text{CO}_2}} = 2,2 \cdot 10^3$ ,  $C_{V_{\text{H}_2\text{O}}} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$  – удельная теплоемкость соответственно углекислого газа и водяного пара при постоянном объеме;  $Q = 35840 \text{ кДж}/\text{кг}$ ;  $T_{\text{н}} = 293 \text{ К}$ ,

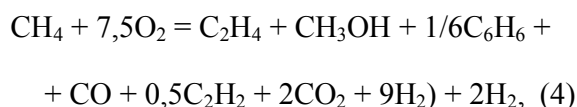
$$\begin{aligned} T_{\text{в}} &= 293 + \frac{35840 \cdot 10^3}{(1,17 \cdot 2,2 \cdot 10^3 + 2,8 \cdot 1,6 \cdot 10^3)} = \\ &= 293 + 5080 = 5373 \text{ К}. \end{aligned}$$

На основании уравнения (2)  $m = 3$  и  $n = 3$ .

Давление взрыва метана по формуле (1) при  $P_0 = 0,1 \text{ МПа}$ :

$$P_{\text{в}} = 0,1 \cdot \frac{5373}{293} \cdot \frac{3}{3} = 1,83 \text{ МПа}.$$

В расчете термодинамических параметров метана при взрыве в воздухе в замкнутом объеме (см. рисунок) необходимо учитывать, что процесс взрыва и горения горючей смеси метана с воздухом можно представить как процесс неполного окисления и горения метана [4]:



где  $\text{C}_2\text{H}_4$  – 6 %;  $\text{CH}_3\text{OH}$  – 6 %;  $\text{C}_6\text{H}_6$  – 1 %;  $\text{CO}$  – 6 %;  $\text{C}_2\text{H}_2$  – 3 %;  $\text{CO}_2$  – 12 %;  $\text{H}_2\text{O}$  – 54 %;  $\text{H}_2$  – 12 %.

Процесс неполного окисления и горения метана можно представить в виде комплекса из 12 формул [4].

Средняя молекулярная масса известной смеси в процентах вычисляется по формуле

$$M_{\text{см}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i M_i}{100}, \quad (5)$$

где  $y_1, y_2, \dots, y_n$  – молярные (объемные) доли компонентов смеси, %;  $M_1, M_2, \dots, M_n$  – молекулярные массы компонентов (этилена, метанола, бензола, оксида углерода, ацетилена, углекислого газа, паров воды, водорода),

$$M_{\text{см}} = 2214/100 = 22,14.$$

Плотность смеси  $\rho_{\text{см}} = M_{\text{см}}/22,41 = 0,988 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Из уравнения реакции горения метана (2) получаем значения  $m$ ,  $n$  ( $m = n = 3$ ). Метан взрывается в замкнутом объеме при концентрации от 5 до 16 %.

Объем рабочей камеры объемного насоса с высоконапорной продольной волной зависит от вида и количества горючего топлива для взрыва. Тепловой расчет насоса на газообразном топливе производится по следующей схеме: задается состав топлива, его составляющие (в зависимости от поставок)

C, H, O и N и определяется низшая теплота сгорания  $Q_n^p$  [1].

Например, для метана ( $CH_4$ )  $Q_n^p = 8087$  ккал/м<sup>3</sup> или  $Q_n^c = (33,5-35,5) \cdot 10^3$  кДж/м<sup>3</sup>.

Определяется необходимое количество воздуха для полного сгорания 1 кг топлива:

$$L_0 = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3} C + 8H - O \right), \quad (6)$$

где 0,23 – массовая доля кислорода в атмосферном воздухе.

Для метана  $L_{0CH_4} = 9,52$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Теплотворная способность 1 м<sup>3</sup> нормальной горючей смеси – 770 ккал/м<sup>3</sup>, октановое число – 110, удельный вес при 0 °C и 760 мм.рт.ст. – 0,717 кг/м<sup>3</sup>. Количество воздуха для полного сгорания 1 кг метана равно 0,331 кмоль/кг. Начальный объем взрывчатой смеси определяется объемом взрывной камеры  $V_{квз}$ .

Теоретическая подача объемного насоса с высоконапорной продольной волной за 1 ч:

$$q_T = V_{квз} \psi_T 60, \quad (7)$$

где  $\psi_T$  – частота взрывов топлива в рабочей камере.

Одним из вопросов, связанным с взрывом газа, является определение давления на границе подпружиненной камеры с жесткими стенками (см. рисунок) и жидкой фазой [3]. В газе с плотностью  $\rho_0$  и теплоемкостью  $C_V$ , будем считать его идеальным, в небольшом объеме  $V$  в течение короткого промежутка времени  $t$  выделяется большая энергия  $E$ .

В результате взрыва газа от места выделения энергии распространяется ударная волна. В этом случае движение газа определяется двумя размерными постоянными: энергией взрыва  $E$  и начальной плотностью газа  $\rho_0$ .

Исходными уравнениями для границы газ – жидкость являются уравнения неразрывности, которые для нормального падения имеют вид:

$$P_{вг} = P_{ж}, \quad U + \Delta U = v, \quad (8)$$

где  $U$  – скорость смещения продуктов взрыва в детонационной волне;  $\Delta U$  – изменение скорости  $U$  после взаимодействия волны со стенкой камеры;  $v$  – скорость смещения границы раздела;  $P_{вг}$  – давление в газовой среде после отражения продуктов взрыва от стенок камеры;  $P_{ж}$  – давление в жидкой фазе.

Для ударных волн, преломляющихся из менее плотной среды в более плотную, например, из взорвавшегося газа в камере с жесткими стенками в жидкую фазу вне ее [3], используется импеданс взрыва газа к произведению  $\rho_{ж} C_{ж}$ :

$$R_{и} = \frac{\rho_{вг} C_{вг}}{\rho_{ж} C_{ж}}, \quad (9)$$

где  $C_{ж}$  – скорость звука в жидкой фазе;  $C_{вг}$  – скорость звука в газовой смеси,  $C_{вг} = \sqrt{c_p / c_v RT}$ .

Внутренняя энергия взрывающегося газа может быть определена по формуле

$$\Xi = \frac{P}{(\gamma + 1) \rho_{вг}}. \quad (10)$$

Для жидкости уравнение состояния обычно принимается в форме Тэта [3]

$$P_{ж} = P_{\phi} = \frac{\rho_{ож} C_{ж}^2}{n_2} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_{ож}} \right)^{n_1} - 1 \right], \quad (11)$$

где  $P_{ж}$  – давление жидкости;  $\rho$ ,  $\rho_{ож}$  – плотности жидкой фазы и в невозмущенной среде;  $n_1$ ,  $n_2$  – эмпирические коэффициенты;  $C_{ж}$  – скорость звука в невозмущенной жидкости.

Для количественной характеристики процессов детонации взрывающихся газов необходимо знать следующие величины [5]:  $P_n$ ,  $\rho_n$ ,  $T_n$ ,  $E_n$ ,  $U_n$ ,  $D$ , для определения которых имеются шесть основных уравнений. На основании [5] для стехиометрической смеси метана ( $CH_4$ ) с воздухом при массовой концентрации 5,46 % получим:  $P_n = 1,79$  МПа,  $\rho_n = 2,1142$  кг/м<sup>3</sup>,  $\gamma = 1,256$ , затем  $P_{см} = (1,79 \cdot 0,985) / 2,56 = 0,689$  МПа из уравнения  $\frac{P_{см}}{\rho_{см}^{\gamma}} = \frac{P_n}{\rho_n^{\gamma}}$ .

## Выводы

При неполном сгорании метана в замкнутом объеме с жесткими стенками давление будет меньше, чем при полном сгорании и взрыве метана ( $0,689 < 1,79$  МПа).

Регулируя количество кислорода в смеси метана с воздухом, можно уменьшать давление во взрывной камере спиралевидного насоса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Авакян Г.А.* Расчет энергетических и взрывчатых характеристик ВВ, М., 1964. 106 с.
2. А.с. № 1281760. СССР. Гидравлический насос / А.Б.Незаметдинов, Н.П.Бойцов. Оpubл. 1987. Бюл. № 1.
3. Волны сжатия в обводненном трещиноватом массиве / В.А.Боровиков, И.Ф.Ванягин, М.Г.Менжулин, С.В.Цирель. Л., 1989. 85 с.

4. *Лавров Н.В.* Физико-химические основы процесса горения топлива. М., 1976, 272 с.

5. *Орленко Л.П.* Вычисление параметров детонационных волн в газовых системах // Физика взрыва. Т.1. М., 2002. С.88-93.

## REFERENCES

1. *Avakian G.A.* Calculation of energy and explosive characteristics of explosives, Moscow, 1964. 106 p.
2. Autor'scertificate of the USSR N 1281760. Hydraulic Pump / A.B.Nezametdinov, N.P.Boitsov. Publ. 1987. Bul. N 1.
3. *Borovikov V.A., Vanyagin J.F., Menzhulin M.G., Tsirel S.V.* Compression waves in flooded cracked array. Leningrad, 1989. 85 p.
4. *Lavrov N.V.* Physical-chemical basis of the combustion of fuel, Moscow, 1976. P.272.
5. *Orlenko L.P.* Calculation parameters of detonation waves in gas systems // Explosion physics. Vol.1. Moscow, 2002. P.88-93.