

*В.Н. Сырых, к.т.н., доцент, НУГЗУ,  
К.М. Карпец, к.геогр.н., научн. сотр., НУГЗУ*

## **ОЦЕНКА ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ, ВЫЗВАННОЙ ВЗРЫВОМ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО КОТЛА IGNIS-500**

(представлено д-ром техн. наук Кривцовой В.И.)

Рассмотрены обстоятельства, динамика возникновения и развития чрезвычайной ситуации, а также наиболее характерные поражающие факторы физических взрывов.

**Ключевые слова:** теплообменник, физический взрыв, ударная волна.

**Постановка проблемы.** Исходными данными комплексного исследования возникновения чрезвычайной ситуации являются:

- фактические данные об объекте взрыва (модульная твердотопливная котельная);

- нормативные и фактические параметры работы котлов;

- обстоятельства, динамика возникновения и развития чрезвычайной ситуации, зафиксированные в представленных на исследование материалах и полученные экспертным путем – при лабораторном исследовании образцов сажи, изъятых из внутренней топки котла, и натурном исследовании места взрыва;

- информация о последствиях воздействия опасных факторов взрыва на технологическое оборудование и строительные конструкции котельной.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Согласно научной классификации взрывов, приведенной в работе [1], все взрывы по механизму возникновения и образования опасных факторов (последствий взрыва) можно классифицировать на физические, химические и комбинированные.

Как известно [2], во время произвольного распада газодинамического разрыва при определенных условиях возможно возникновение следующей ситуации. Разрыв распадается на ударную волну и волну разрежения, движущиеся в противоположные стороны, и на контактный разрыв. На практике такая ситуация реализуется при разрушении оболочки емкости с последующим столкновением газов (паров), одного находившегося под давлением, и второго – окружающей газовой среды. Это наиболее типичный сценарий развития аварийного взрыва емкостей, как с горючими, так и с негорючими веществами, который реализуется при следующих условиях:

$$\frac{2c_{s2}}{\gamma_2 - 1} \left(1 - \frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{\gamma_2 - 1}{2\gamma_2}} < u_1 - u_2 < (P_2 - P_1) \sqrt{\frac{2/\rho_1}{P_1(\gamma_1 - 1) + P_2(\gamma_1 + 1)}} \quad (1)$$

где  $\gamma_2$  – коэффициент адиабаты второй газовой среды;  $c_{s2}$  – скорость распространения звука во второй газовой среде;  $P_1, P_2$  – давление газовых сред (давление первой газовой среды  $P_1$  меньше, чем давление второй газовой среды  $P_2$ );  $u_1, u_2$  – скорость движения газов первой и второй сред;  $\rho_1$  – плотность газа первой среды;  $\gamma_1$  – коэффициент адиабаты первой газовой среды.

Разрушения емкостей с легкокипящими жидкостями, находящимися под давлением, также сопровождается возникновением извне воздушной ударной волны и проникновением во внутрь емкости волны разрежения. Это вызывает вскипание жидкой фазы в сосуде и интенсивное парообразование. В результате высвобождения энергии фазового перехода и энергии, накопившейся при сжатии вещества, оболочка емкости разрушается с разлетом осколков на большие расстояния.

**Постановка задачи и ее решение.** Обобщая научно обоснованные данные об условиях возникновения и динамики развития физических, химических и комбинированных взрывов, а также данные, полученные при исследовании места взрыва, утверждается, что имел место физический взрыв теплообменника твердотопливного котла IGNIS-500. Данное утверждение подтверждается следующими фактами:

- в твердотопливном котле IGNIS-500 в качестве топлива не применялись горючие газы и жидкости, способные образовывать взрывоопасные ГПВС;

- характер разрушения теплообменника котла IGNIS-500 указывает на действие динамических нагрузок, действовавших изнутри аппарата (рис.1, 2).

По данным [3] при взрыве парового котла происходит физическое изменение вещества, сопровождающееся мгновенным выделением большого количества энергии. При этом в нем резко снижается давление, и вода мгновенно испаряется. Объем, занимаемый этим паром, значительно превышает объем воды, которая находилась в котле. Части котла разлетаются на значительное расстояние, принося разрушения за пределами здания.

Для аварий на промышленных объектах, которые не сопровождаются пожарами и химическими взрывами, наиболее характерными поражающими факторами являются ударная волна и осколочное воздействие при физических взрывах технологических аппаратов, находившихся под давлением.

Установлено, что средняя степень разрушения здания с металлическим каркасом и стенами из листового металла вызывается избыточным давлением ( $\Delta P$ , кПа) при физических взрывах, эквивалентных взрывам ВВ или горючих газо-паровоздушных смесей с импульсом

ударной волны ( $i$ , кПа/с) в интервале от 111,3 кПа/с до 121,3 кПа/с.



**Рис. 1. Общий вид котла IGNIS-500 со следами разрушения металлического теплообменника и корпуса**



**Рис. 2. Следы деформации металлического корпуса котла IGNIS 500 в результате действия динамических нагрузок изнутри**

Для разрушения ударной волной стальных каркасов промышленных зданий значение критического (избыточного) давления  $\Delta P$  соответствует 20 кПа.

Взрыву парового котла предшествует физическое изменение вещества, сопровождающееся мгновенным выделением большого количества энергии. В случае, что исследуется, в результате взрывного разрушения теплообменника твердотопливного котла данный агрегат был выброшен за пределы здания на 2,5-3 м.

Известно [4], что энергетический потенциал ( $E$ , МДж) взрыва сосудов с негорючими газами определяется энергией адиабатического расширения газов – единственной энергией, которая высвобождается при взрывах таких сосудов, находящихся под давлением. В данном случае, энергетический потенциал взрыва теплообменника твердотопливного котла IGNIS-500 обуславливался энергией адиабатического расширения насыщенного водяного пара. Являясь негорючим веществом, насыщенный водяной пар при физическом взрыве теплообменника не образует дополнительной энергии, которая выделяется при сгорании горючих газов.

В данном исследовании энергетический потенциал ( $E$ ) физического взрыва теплообменника твердотопливного котла IGNIS-500 определяется в соответствии с методикой [4].

Энергетический потенциал физического взрыва парового котла определяется по формуле (2)

$$E = V \frac{P_p - P_0}{k - 1}, \text{ МДж}, \quad (2)$$

где  $k$  – показатель адиабаты. Для насыщенного водяного пара при температуре  $100^\circ\text{C}$   $k=1,324$ ;  $V$  – объём разрушившегося резервуара,  $\text{м}^3$ .

Объём теплообменника твердотопливного котла IGNIS-500 равен  $1,22 \text{ м}^3$ ;  $P_0=0,1 \text{ МПа}$  – атмосферное давление;  $P_p$  – давление разрушения резервуара, МПа.

Давление разрушения резервуара ( $P_p$ ) оценивается по формуле (3):

$$P_p = 1,2 P_{\text{пр}}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{пр}}$  – пробное давление при гидравлическом испытании сосуда, МПа.

Из представленных на исследование материалов известно, что пробное давление при гидравлическом испытании котла соответствовало  $0,6 \text{ МПа}$ .

Подставляя исходные данные в формулы 2 и 3, получим:

$$P_p = 1,2 \cdot 0,6 = 0,72 \text{ МПа},$$

$$E = 1,22 \cdot \frac{0,72 - 0,1}{1,324 - 1} = 2,33 \text{ МДж}.$$

Определяем мощность физического взрыва теплообменника котла IGNIS-500 в тротиловом эквиваленте:

$$W_T = \frac{0,4 \cdot E}{0,9 \cdot q_T} = \frac{0,4 \cdot 2,33}{0,9 \cdot 4,19} = 0,247 \text{ кг}, \quad (4)$$

где  $q_T = 4,19$  МДж/кг – удельная энергия взрыва тринитротолуола.

Проведенный расчет показал, что энергия физического взрыва парового котла составляла 2,33 МДж, что эквивалентно мощности взрыва 247 г тринитротолуола.

**Выводы.** Обобщая результаты исследования по данному вопросу, делается вывод о том, что организационной причиной разрушения технологического оборудования и здания модульной котельной является отступление от правил технической эксплуатации и режимов работы установки, а также несоблюдения трудовой и производственной дисциплины оператором котельной. Это обусловило появление технической причины разрушения, выразившейся, наиболее вероятно, в снижении уровня воды в теплообменнике котла, что привело к превышению в нем рабочего давления выше критического, с последующим взрывным разрушением корпуса и здания модульной котельной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Таубкин И.С. Судебная экспертиза техногенных взрывов / Таубкин И.С. – М.: Издательство «Юрлитинформ», 2009. – 592 с.

2. Зельдович Я.Б. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 492 с.

3. Власенко С.А. Повышение безопасности паровых котлов малого давления в АПК при работе предохранительных клапанов путем разработки инженерно-технических мероприятий // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. по специальности 05.26.01. – М.: 2003. – 24 с.

4. Кардаков С.В. Оценка поражающего действия взрывов реципиентов и их учет при проектировании производств продуктов разделения воздуха / С.В. Кардаков, А.В. Фёдорова // Технические газы. – 2009. – № 1. – С. 58-63.

V.M. Sirih, K.M. Karpets

**Оцінка причин виникнення надзвичайної ситуації, спричиненої вибухом твердопаливного котла IGNIS-500**

Розглянуто обставини, динаміка виникнення та розвитку надзвичайної ситуації, а також найбільш характерні вражаючі фактори фізичних вибухів.

**Ключові слова:** теплообмінник, фізичний вибух, ударна хвиля.

V.M. Sirih, K.M. Karpets

**Assessment of the causes of the emergency caused by the explosion of solid fuel boilers IGNIS-500**

We consider the circumstances and dynamics of the emergence and development of emergency sition, and the most typical factors affecting physical explosions.

**Keywords:** heat exchanger, physical explosion, the shock wave.