

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОБЛЮДЕНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ НА УГЛЕДОБЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ¹

©2017 г. А.А. Васин, Е.А. Козырева, А.С. Тюленева

Москва, МГУ
kateco@mail.ru

Поступила в редакцию 20.12.2016 г.
После доработки 24.01.2017 г.

Рассматриваются причины нарушений техники безопасности на угледобывающих предприятиях. Описаны модель контроля при фиксированных штрафах и модель, где в качестве наказания за нарушение техники безопасности применяется увольнение. Используется теоретико-игровой подход для проектирования эффективной управляющей структуры, позволяющей исключить возможность коррупционного сговора. Найдены оптимальные вероятности проверок и зарплаты инспекторов, минимизирующие затраты. Проведено сравнение одноуровневой и двухуровневой систем контроля. Для каждого варианта указана область значений параметров, в которой данный вариант предпочтителен.

Введение. Уголь имеет ключевое значение для мировой экономики. На этот энергетический ресурс приходится 41 % от мирового производства электроэнергии. Уголь используется для производства более 70% стали в мире. По добыче этого полезного ископаемого Россия занимает шестое место в мире с объемом 334.1 млн.т в 2014 г. Крупнейшими производителями угля являются США (916 млн.т) и Китай (3747 млн.т) [1]. При добыче угля особое значение имеет обеспечение безопасных и экономически эффективных условий труда. Это связано с тем, что аварии на шахтах являются причиной гибели людей, приводят к тяжелым социальным последствиям, нарушают

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-01-00353\16).

производственный ритм работы. Данная статья посвящена проблеме соблюдения техники безопасности на угледобывающем предприятии. Актуальность данной проблемы подтверждается регулярными авариями на угольных шахтах. Одна из крупнейших за последнее время аварий случилась на шахте "Северная" в Воркуте. На глубине 748 м. произошло несколько взрывов, в результате которых погибли 36 человек. Комиссия Ростехнадзора классифицировала аварию как "взрыв метановоздушной смеси" [2].

Метан — это газ без цвета и запаха. Скапливаясь в пустотах среди пород, газ может создавать взрывоопасные смеси, которые высвобождаются при ведении горных работ. Взрывоопасной считается смесь с содержанием метана 5%. Это значение может несколько изменяться под влиянием температуры, давления воздуха, а также содержания иных газов в атмосфере шахты. Правила безопасности [3] устанавливают верхнюю границу содержания метана в атмосфере шахты. Безопасной считается концентрация до 2%, при этом для наиболее опасных зон, очистных и подготовительных забоев (где выделяется основное количество газа), допустимая концентрация установлена в 1%. Для контроля содержания метана на шахтах обязательно устанавливаются специальные сертифицированные газоанализаторы. При работе шахтеры должны руководствоваться показаниями этих датчиков и прекращать работу, если значение превышает допустимую норму.

Если сравнивать производительность труда в развитых странах, то самая высокая наблюдается на угледобывающих предприятиях США. Она превосходит российские и китайские показатели примерно в 6-8 раз [1, 4]. По данным статистики за 1991-2012 гг., в США в среднем гибли от 25 до 47 человек в год [5]. За тот же период в России гибли от 148 до 210 человек в год. Основными причинами аварий можно назвать обрушение пород и взрывы метана. Так, на обрушение пород приходится примерно 60% [4] травматизма по всем миру. Данный вид аварий до сих пор считается непрогнозируемым. Взрывы метана характерны в большей степени для отечественных шахт. Несмотря на то, что в нормальных

условиях необходимая для взрыва концентрация метана в 2 раза больше законодательной нормы, данный вид аварии происходит довольно часто. Эти факты указывают на возможную несогласованность интересов государства, руководства горнодобывающей компании и работников, а, следовательно, необходимость более жесткого контроля. Похожие выводы получены в работе [6], где обсуждаются вопросы, касающиеся соблюдения техники безопасности в горнодобывающей промышленности Австралии.

Какие экономические причины толкают работников на нарушение правил техники безопасности? Зарплата распределяется внутри бригады следующим образом: есть тарифная ставка и премия от вклада каждого члена бригады. Существует положение по премированию рабочих на каждом участке, в котором определены показатели премирования (депремирования) и их весовой коэффициент. Основные показатели участка - объем добычи, длина проходки, дополнительные показатели - качество угля, нарушения техники безопасности, травматизм, соблюдение проектных параметров (сечение выработки, паспорта крепления выработок и др.). На вспомогательных участках заработная плата складывается из тарифа и премии за выполнение плана в целом по шахте. Случаи простоя оплачиваются согласно ст. 157 ТК РФ [7]: «Время простоя по вине работодателя оплачивается в размере не менее двух третей средней заработной платы работника. Время простоя по причинам, не зависящим от работодателя и работника, оплачивается в размере не менее двух третей тарифной ставки, оклада (должностного оклада), рассчитанных пропорционально времени простоя». Примерное соотношение оклада и премий на угольных шахтах составляет 70/30. Таким образом, во время простоя работники, занятые добычей угля и проходкой, получают зарплату почти в 2 раза меньше, чем при работе. Такая разница провоцирует сговор между работниками и лицами, ответственными за контроль, с целью сокрытия реальных показаний датчиков. Конечно, в этих рассуждениях не учитываются ожидаемые материальные потери в случае взрыва метана. Так как такие аварии являются достаточно редкими событиями, многие работники не воспринимают эту

компоненту или считают требования техники безопасности слишком жесткими. Возникает задача создания контролирующей структуры, обеспечивающей соблюдение техники безопасности и учитывающей возможность коррупции.

Подобные задачи возникают не только в горнодобывающей промышленности, но и в других сферах, и их изучению посвящен ряд статей. В [8] показано, как с минимальными затратами создать эффективную контролируемую структуру, обеспечивающую законопослушное поведение и подавляющую коррупцию. В настоящей работе мы развиваем предложенную модель инспекции с точки зрения руководства угольной компании, заинтересованного в соблюдении техники безопасности. Для исключения возможности сговора необходима проверка доверенными лицами руководства (честный контроль на верхнем уровне). Ниже они названы внешними инспекторами. Кроме того, в качестве инспекторов первого уровня выступают шахтовые инспектора. Качественное отличие нашей модели от модели, рассмотренной в упомянутой статье, в том, что нарушение техники безопасности в случае сговора работников с шахтовым инспектором может быть обнаружено только в ходе внезапной проверки внешним инспектором.

Более подробно ограничения, накладываемые спецификой отрасли, рассмотрены в [9]. В этой работе исследованы возможности применения иерархической модели организации контролирующей структуры для решения задачи повышения безопасности на горнодобывающем предприятии, показана целесообразность подобного подхода при соблюдении ряда условий, которые были учтены нами при построении модели. Развитие теоретико-игрового подхода для предприятий горнодобывающей отрасли происходит в [10] при построении модели выбора оптимальной нормы порогового содержания метана с точки зрения повышения прибыли и снижения аварийности. Наша **статья** направлена на создание эффективной системы контроля за соблюдением этой нормы.

Ниже описаны две модели организации инспекции. Для модели с фиксированными штрафами определена оптимальная вероятность проверки внешним инспектором. Во

второй модели, где в качестве наказания за нарушение техники безопасности рассматривается увольнение, найдено оптимальное значение зарплаты шахтового инспектора с точки зрения уменьшения затрат на проверки. Определено условие, при котором участие в проверке шахтового инспектора более выгодно, чем прямая проверка бригады внешним инспектором. Проводятся численные расчеты на основе реальных значений параметров модели.

1. Модель организации инспекции. Предположим, что соблюдение правил техники безопасности обеспечивает максимальную среднюю прибыль на предприятии (с учетом ожидаемых потерь в случае аварии), и руководство заинтересовано в отсутствии нарушений нормы. В противном случае для организации эффективной инспекции потребовалось бы больше уровней.

При разработке моделей контроля техники безопасности необходимо проанализировать возможность эффективного внешнего контроля. Внешний контроль может осуществляться как дистанционно при помощи оборудования (датчики, камеры видеонаблюдения), так и личной проверкой на месте. Однако в первом случае оборудование можно повредить или установить таким образом, чтобы его показания не отражали действительность (например, закрыть датчик прозрачным непроницаемым колпаком или установить его под вентиляцией, не попадающей в поле обзора камеры видеонаблюдения). Во втором случае проблема возникает, если работники будут заранее оповещены о приезде внешнего инспектора на шахту. Тогда возможно быстро имитировать аварийную ситуацию (направить струю метана из баллона на датчик или снять защитный колпак – по показаниям датчиков ситуация неотличима от выброса метана). После этого работы сворачиваются и все рабочие эвакуируются. Внешний инспектор не может спуститься в шахту инкогнито, если охранники, работающие на верхних уровнях, предупредят шахтеров.

Возможны следующие подходы к решению указанной проблемы: скрытое видеонаблюдение, лояльная к руководству охрана, обеспечивающая внезапный приход

внешнего инспектора. Далее предполагаем, что внешний инспектор может провести внезапную проверку и выявить указанные нарушения, однако такая проверка требует существенных затрат.

2. Модель с фиксированными штрафами. Рассмотрим двухуровневую модель инспекции работы шахты с участием трех агентов: бригада (контролируемый агент нулевого уровня), шахтовый инспектор, внешний инспектор. Функционирование инспекции описывается следующим образом. Поскольку шахтовый инспектор находится в непосредственной близости от места проведения работ, считаем, что он всегда может проверить соблюдение бригадой техники безопасности. Его зарплата фиксирована и не зависит от того, позволяет уровень метана добывать уголь или нет. Рабочее время делится на периоды, в каждый из которых концентрация метана превышает допустимый техникой безопасности уровень с вероятностью h и может быть произведена проверка шахты внешним инспектором. Вероятность такой проверки p . В случае выявления нарушений шахтовый инспектор и бригада наказываются штрафами f_{ins} и f_{br} соответственно. Внешний инспектор является доверенным лицом руководства и никогда не вступает в сговор с бригадой и шахтовым инспектором, которые могут договориться между собой и создать коалицию. Таким образом, стратегия организации инспекции при фиксированных штрафах определяется вероятностью проверки p .

Доход бригады напрямую зависит от уровня метана в шахте. В случае допустимого уровня метана бригада получает высокий доход V_H , иначе (при остановке работ) - V_L .

Подробнее рассмотрим поведение коалиции бригады и шахтового инспектора. Назовем стратегию устойчивой к отклонению коалиции, если суммарный выигрыш ее членов достигает максимума при честном поведении.

Важным вопросом является способность бригады оперативно оценивать текущий уровень метана и своевременно отключать датчики. Рассмотрим два случая. В первом

случае нарушения техники безопасности (закрываются датчики) происходят только при высоком уровне метана, во втором - постоянно.

Утверждение 1. В случае нарушения техники безопасности только при высоком уровне метана стратегия устойчива к отклонениям коалиции тогда и только тогда, когда

$$p \geq p_1^* \stackrel{\text{def}}{=} \frac{V_H - V_L}{f_{br} + f_{ins}}. \quad (2.1)$$

При постоянных нарушениях техники безопасности - тогда и только тогда, когда

$$p \geq p_2^* \stackrel{\text{def}}{=} \frac{h(V_H - V_L)}{f_{br} + f_{ins}}. \quad (2.2)$$

Доказательство. Выигрыш коалиции при честном поведении должен быть не меньше, чем при нарушении. Среднее значение выигрыша при честном поведении равняется сумме доходов при высоком и при низком уровне метана с учетом вероятностей этих уровней: $h V_L + (1 - h)V_H$. При нечестном поведении работа осуществляется постоянно, следовательно, и доход всегда будет высоким. В первом случае факт нарушения будет установлен только при высокой концентрации метана. А значит, среднее значение выигрыша при нечестном поведении составляет $V_H - h f_{br}p - h f_{ins}p$.

Устойчивость стратегии к отклонениям коалиции означает, что $h V_L + (1 - h)V_H \geq V_H - h f_{br}p - h f_{ins}p$, откуда следует (2.1). Во втором случае средний выигрыш коалиции при нечестном поведении составит $V_H - f_{br}p - f_{ins}p$, откуда получаем (2.2).

При заданных затратах на одну проверку минимизация суммарных издержек на проверки достигается уменьшением их числа.

Утверждение 2. Оптимальная стратегия проверок, устойчивая к коалиционным отклонениям, задается вероятностью p_1^* в случае нарушений только при высоком уровне метана и вероятностью p_2^* в случае постоянных нарушений.

3. Задача выбора оптимальной заработной платы шахтового инспектора. В предыдущих моделях коэффициенты штрафов для проверяемых и издержки

рассматривались как экзогенно заданные параметры. С прикладной точки зрения важно разобраться в том, как они определяются и какова их взаимосвязь. Размер штрафа ограничен законодательно. Взыскание причиненного работодателю ущерба должно производиться с учетом соответствующих ограничений, установленных ст. 138 ТК РФ [7]. Согласно указанной статье, общий размер всех удержаний при каждой выплате заработной платы не может превышать 20 %, а в случаях, предусмотренных федеральными законами, - 50 % заработной платы, причитающейся работнику. Согласно ст. 192 ТК РФ [7], за совершение дисциплинарного проступка, в частности неисполнение или ненадлежащее исполнение по вине работника возложенных на него трудовых обязанностей, работодатель имеет право применить дисциплинарное взыскание. К дисциплинарным взысканиям относится увольнение в случае нарушения требований охраны труда, если это нарушение повлекло за собой тяжкие последствия (несчастный случай на производстве, авария, катастрофа) либо заведомо создавало реальную угрозу наступления таких последствий (ТК РФ, ст. 81 [7]). Таким образом, можно рассматривать увольнение в качестве эффективного способа наказания.

В дальнейших рассуждениях в качестве дохода бригады рассматривается доход бригадира, так как он имеет наибольшее влияние на решение о прекращении или возобновлении работ. Допустим, что в случае увольнения бригадир может претендовать только на зарплату $S_{alt} < S_{br} = V_H - h(V_H - V_L)$. Бригадир осознает, что в случае увольнения он будет получать меньшую зарплату и оценивает размер своего ущерба, учитывая будущие недополученные доходы. Тогда разовый штраф, эквивалентный увольнению, составляет величину $\alpha(S_{br} - S_{alt})$, где $\alpha = (1 - \delta)/\delta$ – коэффициент приведения; δ – коэффициент дисконтирования, относящийся к периоду одной проверки, который используется для пересчета будущих потоков доходов в единую величину текущей стоимости [11]. Соответственно для инспектора разовый штраф равен $\alpha(S_{ins} - S_{alt_i})$, где S_{alt_i} – ожидаемая зарплата инспектора после увольнения по указанной статье.

Отметим, что существует возможность одноуровневой инспекции, где бригада напрямую проверяется внешним инспектором. При этом оптимальная стратегия проверок, обеспечивающая невыгодность нарушений, задается вероятностью $p_1^* = (V_H - V_L)/f_{br}$ в случае нарушений только при высоком уровне метана и $p_2^* = h(V_H - V_L)/f_{br}$ в случае постоянных нарушений. Пусть k_i , $i = 1, 2$, определяются из условий $V_H - V_L = k_1 S_{br}$, $h(V_H - V_L) = k_2 S_{br}$. Т. е. при сделанных ранее предположениях $p_i^* = k_i S_{br}/f_{br}$, $i = 1, 2$. Для удобства введем величину $\Delta = S_{br} - S_{alt}$. Минимальные затраты на организацию одноуровневой инспекции принимают вид $C_1 = c_{ex} k S_{br}/(\alpha \Delta)$.

Вернемся к анализу модели двухуровневой инспекции. Согласно утверждению 2, оптимальная вероятность проверки внешним инспектором составляет

$$p_i^* = \frac{k_i S_{br}}{\alpha(S_{br} + S_{ins} - S_{alt} - S_{alt_i})}, i = 1, 2.$$

Будем считать, что затраты на контроль шахтовым инспектором равны его заработной плате S_{ins} за период одной проверки. Расходы на одну проверку внешним инспектором равны c_{ex} . Отметим, что c_{ex} имеет довольно большое значение уровня зарплаты топ-менеджера угольной компании за соответствующее время, необходимое для одной проверки, включая время подготовки и проезд до шахты. Таким образом, затраты на организацию инспекции при оптимальной вероятности проверки составляют:

$$C(S_{ins}) = S_{ins} + \frac{c_{ex} k S_{br}}{f_{br} + f_{ins}} = S_{ins} + \frac{c_{ex} k S_{br}}{\alpha(S_{br} + S_{ins} - S_{alt} - S_{alt_i})}.$$

Рассмотрим задачу минимизации функции затрат за счет выбора зарплаты шахтового инспектора:

$$C(S_{ins}) \rightarrow \min \text{ при } S_{ins} \geq S_{alt_i}.$$

Обозначим $\sqrt{c_{ex} k S_{br}/\alpha}$ через γ .

Утверждение 3. Оптимальная заработная плата шахтового инспектора составляет:

$$\begin{cases} S_{ins}^* = \gamma + S_{alt} + S_{alt_i} - S_{br} & \text{при } \gamma + S_{alt} \geq S_{br}, \\ S_{ins}^* = S_{alt_i} & \text{иначе.} \end{cases},$$

Соответствующие минимальные затраты на двухуровневую инспекцию равны:

$$\begin{cases} C_2 = 2\gamma + S_{alt_i} - \Delta & \text{при } \gamma + S_{alt} \geq S_{br}, \\ C_2 = S_{alt_i} + \gamma^2/\Delta & \text{иначе.} \end{cases}$$

Доказательство. Найдем первую и вторую производные функции затрат:

$$C' = 1 - \frac{\gamma^2}{(\Delta + S_{ins} - S_{alt_i})^2}, \quad C'' = \frac{2\gamma^2}{(\Delta + S_{ins} - S_{alt_i})^3} > 0.$$

Из последнего неравенства следует, что функция является выпуклой, ее минимум без учета ограничений достигается при $C' = 0$, откуда получаем, что $S_{ins}^* = \gamma + S_{alt_i} - \Delta$.

Проверим, при каких условиях будет выполняться неравенство $S_{ins}^* \geq S_{alt_i}$. Подставив S_{ins}^* , получим соотношение $\gamma \geq \Delta$. Если данное соотношение не выполняется, минимум функции затрат достигается на границе $S_{ins}^* = S_{alt_i}$.

Найдем условия, при которых участие в контроле техники безопасности шахтового инспектора выгоднее, чем прямая проверка бригады внешним инспектором. Запишем неравенство, в левой части которого стоит функция затрат для одноуровневой инспекции, а в правой части – затраты, полученные из утверждения 3 для двухуровневой инспекции:

$$\begin{cases} \gamma^2/\Delta \geq 2\gamma + S_{alt_i} - \Delta & \text{при } \gamma \geq \Delta, \\ \gamma^2/\Delta \geq S_{alt_i} + \gamma^2/\Delta & \text{иначе.} \end{cases}$$

Второе неравенство системы никогда не выполняется при указанном условии, то есть сравнивать варианты нужно, только если затраты на одну внешнюю проверку превосходят $c_{ex_min} = \Delta^2\alpha/(kS_{br})$. Иначе выгоднее проводить прямые проверки.

Рассмотрим подробнее первое неравенство. Оно равносильно $(\gamma - \Delta)^2 \geq S_{alt_i}\Delta$, $\gamma \geq \Delta$. Таким образом, окончательно получаем следующее утверждение.

Утверждение 4. Участие в проверке шахтового инспектора выгоднее, чем прямая проверка бригады внешним инспектором при выполнении неравенства

$$\gamma/\Delta \geq 1 + \sqrt{S_{alt_i}/\Delta} \quad (3.1)$$

Воспользуемся полученными результатами, чтобы сделать практические выводы, исходя из реальных значений параметров модели. По экспертным оценкам среднемесячная зарплата бригадира составляет от 50 до 110 тыс. руб. В качестве расчетного значения возьмем среднюю величину $S_{br} = 80000$. Зарплата бригадира после увольнения за нарушение техники безопасности значительно снизится, так как в течение некоторого времени он не сможет занимать аналогичную должность. Примем $S_{alt} = 0.4S_{br} = 32000$. Таким образом, $\Delta = 0.6S_{br}$.

Напомним, что $V_L = 0.5 V_H$. Будем считать, что техника безопасности нарушается только при высокой концентрации метана. Согласно данным статистики, уровень метана превышает допустимый с вероятностью $h = 0.2$, т. е. среднее время простоев по требованиям техники безопасности составляет 0.2 всего рабочего времени. Тогда $k_1 = (V_H - V_L)/S_{br} = (V_H - V_L)/(0.8V_H + 0.2V_L) = 5/9$.

Найдем коэффициент приведения α , полагая, что бригадир оценивает сумму потерянного дохода в случае увольнения за срок, равный пяти годам, без дисконтирования. Тогда $\alpha = 60$. Подставим эти данные для определения минимальных затрат на внешнюю проверку, при которых надо сравнивать варианты. Получим, что $c_{ex_min} = (0.6 * 80000)^2 60 / (5/9 * 80000) = 3110400$.

Из соотношения (3.1) определим минимальные затраты c_{ex} , начиная с которых организация двухуровневой схемы контроля выгоднее, чем одноуровневая инспекция, как функцию от зарплаты инспектора после увольнения. После преобразований получим $c_{ex} = (\Delta \sqrt{\alpha/(kS_{br})} + \sqrt{S_{alt_i} \alpha \Delta/(kS_{br})})^2$, а после подстановки данных - $c_{ex} = (1764 + \sqrt{64.8 S_{alt_i}})^2$. Например, если $S_{alt_i} = 20000$, $c_{ex} = 8424042$. В диапазоне затрат $c_{ex} \geq$

5 млн. руб зависимость между S_{alt_i} и c_{ex} можно считать линейной. Оптимальная зарплата шахтового инспектора, согласно утверждению 4, имеет вид $S_{ins}^* = S_{alt_i} + Q$, где надбавка к альтернативной зарплате $Q = \gamma - \Delta$. В данном примере $Q \approx 32116$. Зависимость Q от c_{ex} изображена на Рис. 1.

4. Учет дополнительных факторов. В предыдущем разделе мы считали, что у бригадира и шахтового инспектора одинаковые коэффициенты приведения. Однако в реальности это не так. Бригадир может рассчитывать, что в случае увольнения он скоро найдет работу с примерно такой же зарплатой, поскольку вопрос соблюдения техники безопасности не главный при назначении на эту должность. Инспектору в случае увольнения попасть на такую же работу проблематично: рискованно брать инспектором по технике безопасности человека, у которого в трудовой книжке стоит запись об увольнении за несоблюдение техники безопасности. Таким образом у инспектора значительно больший коэффициент приведения. Рассмотрим модель, в которой коэффициент приведения бригадира – α , а шахтового инспектора – $\beta > \alpha$. Тогда разовый штраф для инспектора равен $\beta(S_{ins} - S_{alt_i})$ и затраты на организацию инспекции имеют вид

$$C(S_{ins}) = S_{ins} + \frac{c_{ex} k S_{br}}{\alpha \Delta + \beta(S_{ins} - S_{alt_i})}.$$

Утверждение 5. В указанных условиях оптимальная заработная плата шахтового инспектора

$$\begin{cases} S_{ins}^* = \gamma \sqrt{\alpha/\beta} - (\alpha \Delta / \beta) + S_{alt_i} & \text{при } \gamma \sqrt{\beta/\alpha} \geq \Delta, \\ S_{ins}^* = S_{alt_i} & \text{иначе.} \end{cases},$$

При этой зарплате затраты составят:

$$\begin{cases} C_2 = S_{alt_i} + 2\gamma \sqrt{\alpha/\beta} - (\alpha \Delta / \beta) & \text{при } \gamma \sqrt{\beta/\alpha} \geq \Delta, \\ C_2 = S_{alt_i} + \gamma^2 / \Delta & \text{иначе.} \end{cases}$$

Участие в контроле техники безопасности шахтового инспектора выгоднее, чем прямая проверка бригады внешним инспектором, если и только если

$$\gamma/\Delta \geq \sqrt{\alpha/\beta} + \sqrt{S_{alt_i}/\Delta}. \quad (4.1)$$

Доказательство. Найдем первую и вторую производные функции затрат:

$$C'_2 = 1 - \frac{c_{ex}kS_{br}\beta}{(\alpha\Delta + \beta(S_{ins} - S_{alt_i}))^2}, \quad C''_2 = \frac{2c_{ex}kS_{br}\beta^2}{(\alpha\Delta + \beta(S_{ins} - S_{alt_i}))^3} > 0.$$

Из последнего неравенства следует, что функция является выпуклой, ее минимум достигается при $C' = 0$, откуда получаем, что $S_{ins}^* = \gamma\sqrt{\alpha/\beta} - (\alpha\Delta/\beta) + S_{alt_i}$ (см. доказательство утверждения 3). Проверим, при каких условиях будет выполняться неравенство $S_{ins}^* > S_{alt_i}$. Подставив полученный выше результат, получим соотношение $\gamma\sqrt{\beta/\alpha} \geq \Delta$. Если данное соотношение не выполняется, минимум функции затрат достигается на границе $S_{ins}^* = S_{alt_i}$. При этом $C_1 \leq C_2$. В противном случае обозначим $\sqrt{c_{ex}kS_{br}}$ через m . Тогда $C_1 \geq C_2 \Leftrightarrow m^2/\alpha\Delta - 2m/\sqrt{\beta} + \alpha\Delta/\beta - S_{alt_i} \geq 0 \Leftrightarrow (m - \alpha\Delta/\sqrt{\beta})^2 \geq S_{alt_i}\alpha\Delta$, откуда получим (4.1).

Сделаем практические выводы, исходя из последнего утверждения. Коэффициент приведения шахтового инспектора оценим как 4α , значения прочих параметров возьмем такими же, как в предыдущем пункте. Таким образом $\beta = 240$. Минимальное значение зарплаты внешнего инспектора, начиная с которого имеет смысл рассматривать вариант с двухуровневой инспекцией, составляет $\overline{c_{ex_min}} = \alpha^2 \Delta^2 / kS_{br}\beta = (0.6 * 80000)^2 * 60^2 / (5/9 * 80000 * 240) = 777600$.

Из соотношения (4.1) найдем зависимость граничного значения затрат $\overline{c_{ex}}$ от альтернативной зарплаты инспектора S_{alt_i} : $\overline{c_{ex}} = \left(\alpha\Delta/\sqrt{kS_{br}\beta} + \sqrt{S_{alt_i}\alpha\Delta/kS_{br}} \right)^2 = (882 + \sqrt{64.8 S_{alt_i}})$. На Рис. 2 изображены зависимости граничного значения затрат от S_{alt_i} для обоих рассмотренных примеров ($\beta = \alpha$ и $\beta = 4\alpha$).

Во втором случае граница сдвигается в пользу двухуровневой инспекции (при малых $S_{alt_i} \frac{\bar{c}_{ex}}{c_{ex}} \approx \frac{\beta}{\alpha}$). В частности, при $S_{alt_i} = 20000$, $\bar{c}_{ex} = 4082097$, $c_{ex} = 8665040$. Оптимальная зарплата шахтового инспектора, согласно утверждению 5, имеет вид $S_{ins}^* = Q + S_{alt_i}$, где надбавка к альтернативной зарплате $Q = \gamma\sqrt{\alpha/\beta} - (\alpha\Delta/\beta)$. В данном примере $Q \approx 15458$.

Выше предполагалось, что все агенты риск-нейтральны, то есть оценивают выигрыши при случайном исходе по математическому ожиданию. Однако, разумно предположить, что шахтовый инспектор является риск-избегающим индивидуумом и характеризуется вогнутой функцией полезности $U_i(x)$, где x - величина его дохода. Учет этого фактора также снижает оптимальную вероятность проверок и расчетные затраты для двухступенчатой схемы и делает ее более привлекательной.

Заключение. В данной работе мы, используя методы теории игр, рассмотрели модели организации эффективного контроля соблюдения техники безопасности на угольной шахте. Для двухуровневой схемы контроля, включающей постоянную работу шахтового инспектора и внезапные проверки внешнего инспектора, определены оптимальная вероятность внешней проверки, обеспечивающая невыгодность нарушений техники безопасности и невозможность коррупционного сговора между шахтовым инспектором и бригадой. Также найдена оптимальная зарплата шахтового инспектора, минимизирующая общие затраты на контроль в зависимости от параметров задачи. Мы провели сравнение указанной двухуровневой схемы с одноуровневой, в которой контроль техники безопасности осуществляется только за счет внешних проверок, и определили область параметров, в которой двухуровневая схема выгоднее для компании. Подобные модели можно использовать и для других отраслей, а также для оптимизации работы государственных органов (Ростехнадзора), контролирующих соблюдение техники

безопасности на предприятиях. При этом важнейшим условием для эффективного контроля является обеспечение возможности внезапных проверок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World coal association statistics: <http://www.worldcoal.org>.
2. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.
<http://www.gosnadzor.ru/>.
3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила проведения экспертизы промышленной безопасности" //Приказ Ростехнадзора от 14.11.2013 N 538.
4. *Гражданкин А.И., Печеркин А.С., Иофис М.А.* Промышленная безопасность отечественной и мировой угледобычи // Безопасность труда в промышленности. 2010. №9. С. 36-43.
5. World Coal Association, Mining Safety // <http://www.worldcoal.org/coal/coal-mining/mining-safety>.
6. Coal Mine Safety Audit Report // Mine Safety Operations Branch, 2010.
<http://www.resourcesandenergy.nsw.gov.au>.
7. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ.
8. *Васин А.А., Николаев П.В., Уразов А.С.* Механизмы подавления коррупции // Журн. Новой экономической ассоциации. 2011. С. 10-30.
9. *Васин А. А., Захаров В. Н., Вартанов С. А.* О возможности применения теоретико-игровых принципов для построения модели управления технико-экономическими процессами горного предприятия // Матер. Междунар. конф. "Развитие идей Д.М.Бронникова в области разработки рудных месторождений на больших глубинах." — М.: ИПКОН РАН, 2013. С. 104–108.
10. *Васин А. А., Захаров В. Н., Вартанов С. А.* Разработка технологии непрерывного индивидуального мониторинга условий, интенсивности труда и технологической дисциплины выполнения горных работ шахтерами // 2-я Междунар. научная школа

акад. К.Н. Трубецкого "Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр". М.: ИПКОН РАН, 2016. С. 296–298.

11. *Четыркин Е.М.* Финансовая математика. М.: Дело, 2000. 400 с.

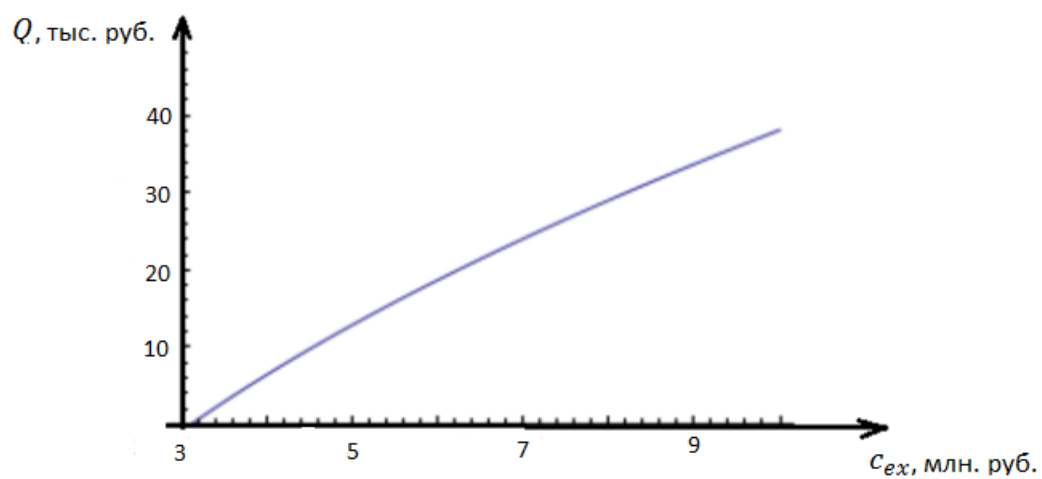


Рис. 1.

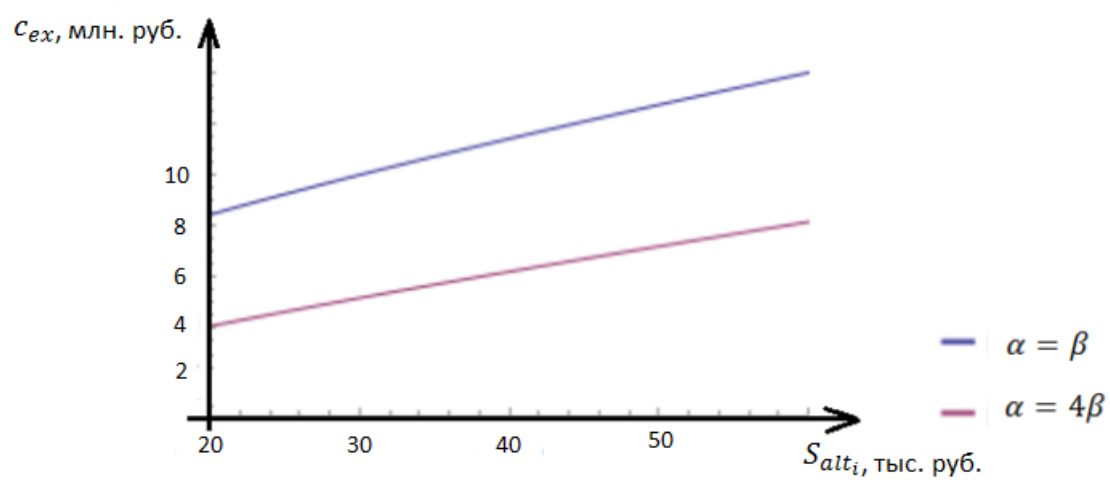


Рис. 2.

Васин
ТиСУ №5-17 г.