

Таким образом, основание, фундамент и здание образуют единую систему, и ее исследование необходимо проводить в соответствии с принципами системного подхода. Такая система является очень большой и сложной, и поэтому ее исследование возможно только приближенными численными методами или численно с помощью современных ПЭВМ. Однако получение приближенного аналитического решения представляет значительный интерес.

Осадка и крен большеразмерной фундаментной плиты на нелинейно деформируемом однородном основании нелинейно зависит от нагрузки, что полностью соответствует многочисленным экспериментальным данным. Таким образом, решения теории линейно-деформируемого полупространства должны быть постепенно заменены на более прогрессивные и более точные методы расчета, основанные на теории нелинейно-деформируемого полупространства. На осадку фундамента влияет больше число факторов. Поэтому уравнения состояния в большинстве случаев получаются очень сложными, требующими большого числа экспериментально определяемых характеристик грунтов. Простые же решения пока дают приближенные результаты, существенно отличающиеся от действительных.

Выводы. Проведенный обзор выявляет малое количество исследований в области проектирование круглых плитных фундаментов на подрабатываемых территориях, описания нелинейности поведения системы «основание - фундамент» в сложных инженерно-геологических условиях и вопросов связанных с устойчивостью сооружений башенного типа и показывает актуальность изучения этих проблем.

Список литературы

1. **Тетиор А.Н.** Фундаменты. Учебное пособие / А.Н. Тетиор // – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 400 с.
2. **Тимченко Р.А.** Совершенствование фундаментов-оболочек для высотных сооружений / **Р.А.Тимченко, В.В. Васильченко** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ, 2003. – Вип. 1. – С. 104-107.
3. Руководство по проектированию плитных фундаментов каркасных зданий и сооружений башенного типа/ НИИОСП им. Н.М. Герсеванова – М.: Стройиздат, 1984. – 263 с.
4. **ДБН В. 1.1.-5-2000.** Будинки і споруди на підроблюваних територіях і просідних ґрунтах (Частина 1. Будинки і споруди на підроблюваних територіях). – К.: Державний комітет будівництва, архітектури і житлової політики України, 2000. – 70 с.
5. **Справочник проектировщика.** Основания, фундаменты и подземные сооружения / Под общ. ред. **Е.А. Сорочана, Ю.Г. Трофименкова** / – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.
6. **Тимченко Р.А.** Осадки фундаментных конструкций на нелинейно-деформируемых основаниях / **Р.А. Тимченко, Д.А. Кришко** / Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ, 2012. – Вип. 29. – С. 110-114.
7. **Тимченко Р.А.** Предельные деформационные воздействия для круглых плитных фундаментов / **Р.А.Тимченко** // Современные проблемы строительства. – Донецк, 2005. – С. 173-177.

Рукопись поступила в редакцию 31.03.12

УДК 622.788.36.5

А.А. ЛАПШИН, канд. техн. наук,

Э.В. СЕРЕБРЕНИКОВ, В.И. ДЕНЬГУБ В.И., кандидаты техн. наук, доценты

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ ВОЗДУХА С ВОДОЙ

Проведен теоретический анализ процесса смешения воздуха с водой в смесителе, входящем в состав устройства, разработанного для охлаждения горных выработок. При анализе используется термодинамический метод.

Анализ условий ведения подземных горных работ указывает на существование проблемы, связанной с нарушением тепловых режимов, что может привести к нарушению условий труда, определяемых техникой безопасности. В связи с этим возникла необходимость устранения таких нарушений. Одним из возможных путей решения этой проблемы является создание устройств, обеспечивающих воздушное охлаждение горной выработки.

В состав таких устройств входят смесители. Рассматривается задача смешения сухого воздуха с водой в смесителе, схема которого приведена на рис. 1 (размеры не соблюдены).

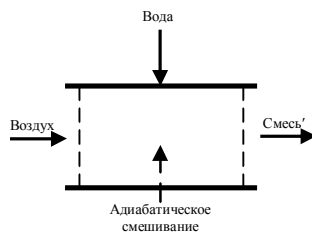


Рис. 1. Схема смесителя

Для решения применяется термодинамический подход.

Термодинамической системой является смеситель. Процесс смешения в системе считается адиабатическим. Это стандартный подход к быстрым потокам, когда теплообмен с окружающей средой не успевает происходить.

Состояния на входе и на выходе считаются равновесными.

Необходимо задать геометрию смесителя через диаметры: $d_{\text{возд.}}$, $d_{\text{воды}}$, d' , м.

Начальные параметры воздуха: давление p , Па; температура $T_{\text{возд.}}$, К; объемный расход $V_{\text{возд.}}$, м³/с.

Начальные параметры воды: $T_{\text{воды}}$, К; $V_{\text{воды}}$, м³/с.

Механический анализ процесса. Все соотношения будут строиться для промежутка времени, равного 1 с. Для перехода в соотношениях от массы к массовому расходу, достаточно в единицах измерения заменить кг на кг/с.

Параметры в конце процесса смешения, т.е. на выходе из смесителя, обозначаются соответствующими буквами со штрихом.

Перейдем от объемов, поступающих в систему за 1 с, к массам.

Масса воздуха $m_{\text{возд.}}$ определяется из уравнения состояния идеального газа Менделеева - Клапейрона

$$pV_{\text{возд.}} = (m_{\text{возд.}}/\mu_{\text{возд.}})RT_{\text{возд.}} \quad (1)$$

где R - универсальная газовая постоянная ($R=8,314$ Дж/(моль·К)); μ - молярная масса (для воздуха $\mu=0,029$ кг/моль, для воды $\mu=0,018$ кг/моль).

Для воды

$$m_{\text{воды}} = \rho_{\text{воды}} V_{\text{воды}} \quad (2)$$

где $\rho_{\text{воды}}$ - плотность воды, кг/м³ (считаем, что $\rho_{\text{воды}}=1000$ кг/м³).

Скорости находятся из объемных расходов в соответствии с определением

$$V = WS, \quad (3)$$

где W - средняя скорость потока, м/с; S - площадь сечения трубопровода, м².

Смешивание потоков воздуха и воды в устройстве происходит по закону абсолютно неупругого удара, известного из теоретической механики. Скорость смеси на выходе из смесителя W' определяется из закона сохранения импульса потока

$$m_{\text{возд.}} W_{\text{возд.}} + m_{\text{воды}} W_{\text{воды}} = m' W' \quad (4)$$

Масса смеси, очевидно

$$m' = m_{\text{возд.}} + m_{\text{воды}} \quad (5)$$

Механическая энергия при смешивании не сохраняется.

Тепловой анализ процесса. Первый закон термодинамики для потоков в рассматриваемом случае сводится к виду

$$H + (mW^2/2) = \text{const}, \quad (6)$$

где H - энтальпия потока, Дж.

В результате смешивания воздуха с водой образуется термодинамическая система, которая называется «Туман». Она состоит из воздуха, капель воды и насыщенного водяного пара. Эта система двухкомпонентная (воздух и вода) и двухфазная (газ и жидкость).

Энтальпия является экстенсивной величиной. Тогда

$$H = H_{\text{возд.}} + H_{\text{воды}} + H_{\text{пара}} \quad (7)$$

По определению

$$H = C_p t, \quad (8)$$

где C_p - изобарная теплоемкость, Дж/°С, t - температура, °С.

Изобарная теплоемкость определяется через удельную изобарную теплоемкость c_p , Дж/(кг·°С)

$$C_p = m c_p \quad (9)$$

Тогда из (8) и (9) получим

$$H = m c_p t \quad (10)$$

Значения удельных изобарных теплоемкостей являются табличными [1] $c_{p\text{Воздуха}}=1000$ Дж/(кг·К) и $c_{p\text{Воды}}=4190$ Дж/(кг·К).

Рассмотрим энтальпию на входе в систему.

Используя (10)

$$H_{\text{возд.}} = m_{\text{возд.}} c_{p\text{возд.}} t. \quad (11)$$

Поскольку пара на входе нет, то

$$H_{\text{воды}} = m_{\text{воды}} c_{p\text{воды}} t \quad (12)$$

По условию, смесь на выходе из системы находится в тепловом равновесии. Это значит, что температуры воздуха, воды и пара равны между собой.

Значение температуры на выходе t' пока неизвестно, и его нужно будет определить.

Для воздуха

$$H'_{\text{возд.}} = m_{\text{возд.}} c_{p\text{возд.}} t', \quad (13)$$

поскольку масса воздуха при смешении не изменяется.

Что же касается воды, то ее исходная масса каким-то образом распределяется между водой и паром в смеси.

Чтобы упростить построения, необходимо рассмотреть энтальпию воды и пара совместно.

Для воды

$$H'_{\text{воды}} = (m_{\text{воды}} - m'_{\text{пара}}) c_{p\text{воды}} t'. \quad (14)$$

Энтальпия пара складывается из двух слагаемых: энтальпии воды и теплоты парообразования

$$H'_{\text{пара}} = m'_{\text{пара}} (c_{p\text{воды}} t' + r'), \quad (15)$$

где r' - удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Нетрудно видеть, что при сложении выражений (14) и (15) получим

$$H'_{\text{воды}} + H'_{\text{пара}} = m_{\text{воды}} c_{p\text{воды}} t' + m'_{\text{пара}} r', \quad (16)$$

т.е. масса пара войдет в сумму только в виде множителя при величине удельной теплоты парообразования. Анализ выражения (16) говорит о том, что помимо отдельной энтальпии для воды, при возникновении в системе пара добавляется теплота парообразования, связанная с фазовым переходом воды в пар.

Величина r' уменьшается с ростом температуры по закону [1]

$$r' = r_0 - 2,3t' \quad (17)$$

где r_0 - значение r' при 0°C , равное $2,5 \cdot 10^6$ Дж/кг. Зависимость от температуры очень слабая. При перепаде температуры в 100°C второе слагаемое в правой части (17) вносит вклад в сумму менее 0,01 %. Поэтому зависимостью r' от температуры (17) вполне можно пренебречь, и считать просто

$$r' = r_0. \quad (18)$$

Осталось определить массу насыщенного пара. Удобнее всего воспользоваться величиной влажосодержания d . По определению

$$d = m_{\text{пара}} / m_{\text{возд.}} \quad (19)$$

Тогда

$$m'_{\text{пара}} = d' \cdot m_{\text{возд.}} \quad (20)$$

Влажосодержание определяется по формуле

$$d' = 0,622 \frac{p'_{\text{пара}}}{p'_{\text{возд.}}}, \quad (21)$$

где $p'_{\text{пара}}$ - парциальное давление пара во влажном воздухе, Па.

Чтобы найти $p'_{\text{пара}}$, необходимо обратиться к таблицам водяного пара [2]. Линейная аппроксимация значений давления имеет вид

$$p'_{\text{пара}} = \alpha t' + \beta \quad (22)$$

где α и β - коэффициенты. Их определение по методу наименьших квадратов в интервале температур от 0°C до 35°C дало значения: $\alpha = 139 \text{ Па}/^\circ\text{C}$, $\beta = 39,7 \text{ Па}$.

Рассмотрим определение $p'_{\text{возд.}}$.

Из условия механического равновесия двухфазной системы «влажный воздух - вода» следует, что

$$p'_{\text{воды}} = p'_{\text{влаж.возд.}} = p'. \quad (23)$$

Влажный воздух представляет собой смесь идеальных газов, состоящую из сухого воздуха и насыщенного водяного пара. В соответствии с законом Дальтона

$$p'_{\text{влаж.возд.}} = p'_{\text{возд.}} + p'_{\text{пара}}, \quad (24)$$

где давление пара определяется по формуле (22).

Тогда

$$p'_{\text{возд.}} = p' - p'_{\text{пара}}, \quad (25)$$

Чтобы получить соотношение, связывающее давление с температурой на выходе из системы, необходимо использовать соотношения

$$V' = W' S', \quad (26)$$

$$V'_{\text{возд.}} = \frac{m'_{\text{возд.}}}{\mu'_{\text{возд.}}} \cdot \frac{R(t'+273)}{p'}, \quad (27)$$

$$V'_{\text{воды}} = \frac{m'_{\text{воды}} - m'_{\text{пара}}}{1000}, \quad (28)$$

$$V'_{\text{пара}} = \frac{m'_{\text{пара}}}{\mu'_{\text{воды}}} \cdot \frac{R(t'+273)}{p'}. \quad (29)$$

Объем является экстенсивной величиной, поэтому сумма (27), (28) и (29) равна (26). С учетом формул (22), (21), (25) и (20), можно получить соотношение, связывающее давление и температуру на выходе из системы

$$W' S' (p' - 139t') = 287 m'_{\text{возд.}} (t' + 273). \quad (30)$$

В этом выражении, во избежание излишней громоздкости, были отброшены малые члены. Относительная погрешность от этого не превышает 1%.

С учетом (30) можно записать формулу (21) влагосодержания в виде

$$d' = 0,3 \cdot \frac{W' S' \cdot t' + 0,286}{m'_{\text{возд.}} \cdot t' + 273}. \quad (31)$$

Приведем окончательные соотношения.

Запишем первый закон термодинамики потоков (6) для параметров на входе в систему. С учетом (7), (11) и (12), получим

$$m'_{\text{возд.}} c_{p\text{возд.}} t' + m'_{\text{воды}} c_{p\text{воды}} t' + \frac{m'_{\text{возд.}} W'^2_{\text{возд.}}}{2} + \frac{m'_{\text{воды}} W'^2_{\text{воды}}}{2} = const. \quad (32)$$

Данное выражение описывает полную энергию потока. Она включает в себя энтальпию, или теплосодержание, и кинетическую энергию. Значения полной энергии, вносимой в систему воздухом и водой, суммируются.

Полная энергия после прохождения через смеситель сохраняется. Это приводит к тому, что на выходе из системы полная энергия должна равняться той же константе.

Тогда уравнение (6), с учетом (16) и (20), запишется в виде

$$m'_{\text{возд.}} c_{p\text{возд.}} t' + m'_{\text{воды}} c_{p\text{воды}} t' + d' \cdot m'_{\text{возд.}} r_o + \frac{m' W'^2}{2} = const. \quad (33)$$

Основной задачей теплового анализа процесса является определение температуры на выходе из смесителя на основе уравнений (32) и (33). Можно показать, что эта задача сводится к решению квадратного уравнения

$$At'^2 + Bt' + C = 0, \quad (34)$$

где A, B, C - постоянные коэффициенты, которые могут быть определены из полученных ранее формул

$$A = m'_{\text{возд.}} c_{p\text{возд.}} + m'_{\text{воды}} c_{p\text{воды}},$$

$$B = 273 \cdot (m'_{\text{возд.}} c_{p\text{возд.}} + m'_{\text{воды}} c_{p\text{воды}}) + 0,3 \cdot W' S' r_{\text{ц}} + \frac{m' W'^2}{2} - const, \quad (35)$$

$$C = 273 \cdot \left(\frac{m' W'^2}{2} - const \right) + 0,086 \cdot W' S' r_o.$$

3. Определение параметров в конце процесса

В состав параметров состояния в конце процесса входят температура T' , давление p' и

плотности ρ' , $\rho'_{\text{возд.}}$, $\rho'_{\text{воды}}$, $\rho'_{\text{пара}}$. Состав смеси также характеризуется массовыми g_i или объемными γ_i долями.

Рассмотрим определение этих параметров. t' определяется как решение уравнения (34). Квадратное уравнение в общем случае имеет два решения. Одно из решений уравнения (34) соответствует отрицательной абсолютной температуре, что не имеет физического смысла. $T'=273+t'$.

Давление находится из соотношения (30). Плотности определяются из формулы

$$\rho = m/V \quad (36)$$

на основе известных массовых и объемных расходов. Массовые расходы находятся с использованием формул (5) и (20). Объемные - по формулам (26), (27), (28), (29).

Массовой долей, по определению, называется величина

$$g_i = m_i/m_{\text{смеси}} \quad (37)$$

Можно определить массовые доли воздуха, воды и пара. Объемной долей, по определению, называется величина

$$r_i = V_i/V_{\text{смеси}} \quad (38)$$

Эта величина также может быть определена.

Поэтому найдены все величины, которые могут пригодиться при описании смеси на выходе из смесителя.

4. Пример.

Рассмотрим конкретный пример установки для охлаждения горных выработок.

Исходные данные и результаты расчетов приведены в таблицах.

Таблица 1

Геометрические параметры установки

$d_{\text{воздуха}}$	2,00	дюйма
$d_{\text{воды}}$	0,75	дюйма
d'	2,00	дюйма

Таблица 2

Параметры на входе

Заданные			Рассчитанные		
P	6	атм	$m_{\text{возд.}}$	0,83	кг/с
$t_{\text{возд.}}$	21	°C	$m_{\text{воды}}$	0,30	кг/с
$V_{\text{возд.}}$	0,1	м ³ /с	$W_{\text{возд.}}$	49,34	м/с
$t_{\text{воды}}$	15	°C	$W_{\text{воды}}$	1,05	м/с
$V_{\text{воды}}$	0,3	л/с	$\rho_{\text{возд.}}$	8,30	кг/м ³
			$\rho_{\text{воды}}$	1000	кг/м ³

Таблица 3

Параметры на выходе

t'	16,01	градC
p'	8,33	атм
W'	36,52	м/с
m'	1 130,50	г/с
m' воздуха	830,50	г/с
m' воды	298,75	г/с
m' пара	1,25	г/с
V'	74,25	л/с
V' воздуха	73,77	л/с
V' воды	0,30	л/с
V' пара	0,18	л/с
ρ'	15,23	кг/м ³
ρ' воздуха	11,26	кг/м ³
ρ' воды	1 000,00	кг/м ³
ρ' пара	6,99	кг/м ³

Таблица 4

Массовые доли компонентов, %

	Вход	Выход
Воздух	73,46	73,46
Вода	26,54	26,43
Пар	0,00	0,11
Сумма	100,00	100,00

Объемные доли компонентов, %		
	Вход	Выход
Воздух	99,70	99,36
Вода	0,30	0,40
Пар	0,00	0,24
Сумма	100,00	100,00

5. Качественный анализ процесса

Интересно также проследить характер зависимости температуры на выходе из системы от заданных объемных расходов воздуха и воды на входе (рис. 2).

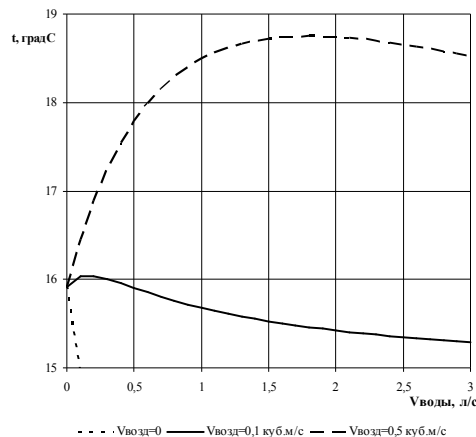


Рис. 2. Температура в зависимости от расхода воды

Графики указывают на немонотонный характер распределения температуры на выходе из смесителя.

Такую зависимость можно объяснить взаимодействием трех факторов: торможением воздуха при смешивании с водой, испарением воды и смешиванием теплого воздуха с холодной водой.

Рассмотрим этот вопрос подробнее (рис. 3).

На рис. 3 приведено изменение температуры в за-

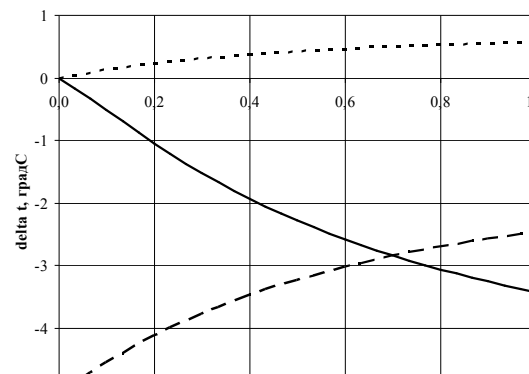


Рис. 3. Влияние различных процессов на изменение температуры

висимости от объемного расхода воды. Объемный расход воздуха считается заданным: $V_{\text{возд}} = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$.

С одной стороны, введение воды в поток воздуха приводит к его торможению, а это, как известно, всегда повышает температуру.

По мере роста расхода воды, поток воздуха тормозится сильнее, и большим становится рост температуры.

С другой стороны, введение воды в систему должно приводить к охлаждению за счет ее испарения с поглощением теплоты, и за счет более низкой ее температуры по сравнению с воздухом. При малых расходах воды основную роль играет испарение, при больших - смешивание теплого воздуха с холодной водой.

Таким образом, проведенное теоретическое исследование поможет в выборе оптимальных значений входных параметров смесителя в составе устройства для охлаждения воздуха горных выработок.

Список литературы

1. Буляндра О.Ф. Технічна термодинаміка. – К.: Техніка, 2001. – 320 с.
2. Сборник задач по технической термодинамике и теплопередаче. Под ред. Б.Н. Юдаева. – М.: Высшая школа, 1968. – 372 с.

Рукопись поступила в редакцию 31.03.12

УДК 658.38

В.О. ЧЕРЕДНІЧЕНКО., аспірантка, ДВНЗ «Криворізький національний університет АНАЛІЗ ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ ТА ПРОФЗАХВОРЮВАНОСТІ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ГЗК КРИВБАСУ ЗА ПЕРІОД 2001-2011 рр.

Проведено порівняльний аналіз виробничого травматизму та профзахворюваності на підприємствах ГЗК Кривбасу за період 2001-2011 рр., визначено їх показники та причини виникнення. Розроблено рекомендації щодо зни-