

Обоснование параметров уплотняющей нагрузки при формировании твердеющей смеси



К. С. ИЩЕНКО,
канд. техн. наук

Обоснована актуальность решения проблемы утилизации отходов углеобьемы и горно-металлургического комплекса в высоконагруженных промышленных регионах страны. Проведены экспериментально-аналитические исследования повышения давления в твердеющей смеси при ее уплотнении. Получены расчетные данные влияния свойств твердеющей смеси на параметры коэффициента влагопроницаемости от уплотняющей нагрузки.

Стабилизация экономического развития страны привела к обострению проблемы отходов, особенно в индустриально нагруженных регионах. Так, по данным Госкомстата по состоянию на 1 января 2011 г., в Украине общее количество отходов составляет порядка 25 – 30 млрд т, из них токсичных – 5 млрд т, что в расчете на одного жителя является наивысшим показателем среди стран Западной и Центральной Европы. При этом ежегодные темпы накопления твердых отходов в Украине достигают 1 млрд т, а бытовых – 10 млн т. Такая угрожающая тенденция – следствие неэффективной, материалоемкой и энергорасходной системы производств, низкий уровень утилизации отходов. Инфильтрация хранилищ, горение терриконов, пылеобразование, другие факторы, которые определяют миграцию токсичных веществ, приводят к загрязнению подземных и поверхностных вод, ухудшению состояния

атмосферного воздуха, земельных ресурсов, что негативно отражается на состоянии здоровья населения [1].

Известно, что при разработке месторождений угля подземным способом широко применяются системы с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями. Как показывает опыт разработки полезных ископаемых с системами закладки выработанного пространства, качество возведения искусственного массива значительно зависит от свойств применяемых материалов [2].

Выбор того или иного материала во многом определяется требованиями к закладочному массиву, способу транспортирования и размещению сооружения в выработанном пространстве. Прочность искусственных целиков и твердеющей закладки обычно не превышает 3 – 10 МПа, поэтому высокомарочные цементы для их возведения использовать нецелесообразно. Их широкое применение возможно только при условии, если для приготовления используют дешевые вяжущие вещества – отходы местного производства при переработке металлургического и горнорудного сырья (доменные гранулированные шлаки, отходы алюминиевого производства, известково-зольные и зольно-цементные вяжущие) и др. Следовательно, одна из основных

задач улучшения экологической безопасности высоконагруженных промышленных регионов – использование при изготовлении закладочных твердеющих смесей отходов горно-металлургических, химических производств, а также углеобьемы и обогащения.

Для формирования высококачественного закладочного массива теоретически и экспериментально оценим фильтрационные возможности твердеющей смеси при одновременном прессовании, выдавливание влаги и фильтрационной консолидации самой смеси, а именно процесс сращивания фракций путем поглощения мелких крупными, раздавливания их и заполнения разрушенными фракциями межпорового (межфракционного) пространства.

На сегодня нет точного аналитического решения и математического описания процесса прессования и выдавливания влаги при фильтрационной консолидации твердеющей смеси, которая подвержена внешним технологическим нагрузкам. Отсутствие исследований по динамике распространения давления в массиве твердеющей смеси от действия уплотняющей нагрузки и предопределило важность обоснования режимов прессования, его длительности и интенсивности.

Теоретическое обоснование механизма уплотнения твердеющей



смеси под действием внешней нагрузки можно решить согласно основным положениям теорий фильтрационной консолидации и гидродинамики.

Воспользовавшись теоремой количества движения, выведем уравнение жидкой фазы, выдавливаемой с помощью внешнего давления из твердеющей смеси [3]:

$$d/dt \iiint \bar{W} m_{ж.ф} dV = \iint \bar{P} dS + \iiint \bar{F} m_{ж.ф} dV, \quad (1)$$

где \bar{W} – относительная скорость выдавливания жидкости из твердеющей смеси;

$m_{ж.ф} = 0,001$ – объемная масса жидкой фазы;

V – объем твердеющей смеси;

t – время протекания процесса;

\bar{P} – относительное давление уплотнения (прессования), прикладываемое на поверхность твердеющей смеси;

S – площадь поперечного сечения поверхности твердеющей смеси;

\bar{F} – относительное усилие, прикладываемое на поверхность твердеющей смеси.

Решая интеграл поверхностных сил и преобразуя его в тройной с учетом образовавшегося объема с последующим решением относительно массовых сил, получим уравнение движения в векторной форме

$$\text{div } \bar{P} + m \bar{W} / K_{\phi} = d(W m_{ж.ф}) / dt, \quad (2)$$

где K_{ϕ} – коэффициент фильтрации твердеющей смеси.

Рассмотрим элементарный объем слоя dx , в котором пористость уменьшается по глубине пропорционально увеличению количества воды, и окончательно запишем

$$\text{div}(m_{ж.ф} \bar{W}) + \partial(m_{ж.ф} \Pi) / \partial t = 0, \quad (3)$$

где Π – пористость.

Известно, что пористость связана с коэффициентом пористости ϵ зависимостью $\Pi = \epsilon / (1 + \epsilon)$, тогда

$$\partial \Pi / \partial t = d\epsilon / (1 + \epsilon) dt. \quad (4)$$

На основе теории уплотнения грунтов получим

$$\partial \Pi / \partial t = -e_0 \partial P / (1 + \epsilon) dt = -e_v \partial P / \partial t, \quad (5)$$

где $e_0 = (\epsilon_1 - \epsilon_2) / (P_2 - P_1)$ – коэффициент уплотнения;

e_v – относительная сжимаемость твердеющей смеси;

P_1 и P_2 – давление в смеси до и в конце уплотнения.

Подставив выражение (5) в уравнение (3), окончательно получим

$$\text{div}(m_{ж.ф} \bar{W}) + (\Pi \partial m_{ж.ф} / \partial \bar{P} - m_{ж.ф} e_v) \partial \bar{P} / \partial t = 0. \quad (6)$$

Следовательно, из-за незначительных изменений плотности воды от прикладываемой нагрузки выражение, описывающее этот процесс, после преобразований представим в виде

$$\text{div}(m_{ж.ф} \bar{W}) + m_{о.ж.ф} (\Pi a_{ж} - e_v) \partial P / \partial t = 0, \quad (7)$$

где $m_{о.ж.ф}$ – относительный объем жидкой фазы;

$a_{ж} = 4 \cdot 10^{-4}$ МПа⁻¹ – коэффициент объемного сжатия воды.

Преобразуем выражение (2), пренебрегая силами инерции,

$$\text{div}(m_{ж.ф} \bar{W}) = -\text{div}(K_{\phi} \text{div } \bar{P}) = 0. \quad (8)$$

Подставив выражение (8) в формулу (7), имеем

$$\partial P / \partial t = \nabla^2 P \cdot K_{\phi} / m_{ж.ф} (\Pi a_{ж} - e_v) = \bar{a}_p \Delta_2 P. \quad (9)$$

Зная модуль деформации $E_{т.с}$, определим относительную сжимаемость e_v твердеющей смеси, подставляя экспериментально полученные данные в выражение

$$e_v = \Delta h \beta / h (P_2 - P_1) = \epsilon_v \beta / \Delta P = \sigma_{сж} \beta / E_{т.с} \Delta P = \beta / E_{т.с}, \quad (10)$$

где Δh – разность высоты образца в начале и в конце прессования;

$\beta = 0,7$ – коэффициент, учитывающий режим прессования твердеющей смеси;

h – высота образца;

ΔP – разность давления уплотнения (прессования) в начале и конце испытания твердеющей смеси.

Параметры уравнения (9), описывающего процесс прессования твердеющей смеси и физически неразрывно связанного с аналогичным уравнением движения грунтовых вод и процессом, например вакуумирования бетонных смесей, определены согласно данным работы [3], которые по своей форме и содержанию соответствуют коэффициенту a_p при операторе Лапласа. Тогда в уравнении (9) коэффициент a_p по своему физическому смыслу характеризует коэффициент влагопроницаемости твердеющей смеси.

Чтобы оценить влияние состава твердеющей смеси на коэффициент влагопроницаемости a_p , проведем расчеты, задаваясь свойствами твердеющей смеси, которые определены при исследовании их физико-механических характеристик. В качестве составов твердеющих смесей для закладки выработанного пространства выбраны составы, приоритет которых защищен патентами Украины [4 – 6].

Таблица 1

Твердеющая смесь	K_{ϕ} , см/с	Π	$E_{т.с}$, МПа	a_p , 10 ⁻² ·м ² /с
Состав 1 [4]	0,0007	0,1	8,9	0,882
Состав 2 [5]	0,00072	0,3	9,1	0,923
Состав 3 [6]	0,00076	0,45	9,6	1,03



Для упрощения расчетов коэффициента влагопроницаемости a_p с точностью до 1 – 1,5 % воспользуемся выражением

$$a_p = K_{\phi} / (m_{ж.ф} e_v) = K_{\phi} E_{т.с} / (m_{ж.ф} \beta). \quad (11)$$

Результаты расчетов коэффициента влагопроницаемости a_p для твердеющих смесей сведены в табл. 1.

В целях определения относительных деформаций во времени при уплотнении твердеющей смеси используем компрессионные кривые, построенные для каждого состава при обоснованном В/Т отношении в диапазоне 0,1 – 0,2 и заданном диапазоне уплотняющей нагрузки 0 – 3 МПа. Задача решалась путем физического моделирования процесса уплотнения твердеющей смеси во времени под воздействием сжимающей нагрузки (прессованием смеси при ее консолидации) с соблюдением критериев подобия.

На предварительной стадии эксперимента в лабораторных условиях определены физико-механические характеристики твердеющих смесей и их относительная влажность по формуле

$$W = [(g_1 - g_2) / (g_2 - g_0)] 100 \%, \quad (12)$$

где g_1 и g_2 – масса бюксы с составом смеси до и после высушивания;

g_0 – масса пустой бюксы, которая составила в среднем 12 – 15 %.

Компрессионные испытания твердеющих смесей проводились на приборе-одометре в соответствии с апробированными методами и действующими ГОСТами. Отметим, что компрессионные испытания отличаются от общих испытаний на сжатие тем, что при их проведении исключается возможность бокового расширения образца.

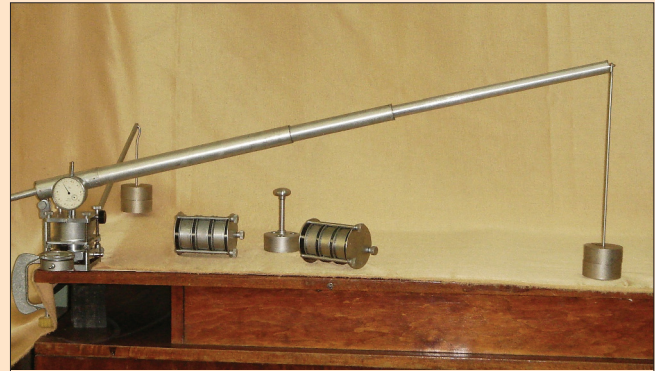


Рис. 1. Общий вид прибора для компрессионных испытаний твердеющих смесей.

Подготовленный состав твердеющей смеси помещали в испытательный цилиндр прибора высотой 0,1 м (при этом «рабочие поверхности» изолировали листами фильтровальной бумаги), сверху которого располагался поршень, перемещающийся при воздействии груза, подвешенного на длинное плечо рычага (рис. 1).

Образец нагружали ступенями с интервалом 0,5 МПа до нагрузки, равной 3 МПа. На каждой ступени фиксировали осадок образца Δh с помощью индикатора часового типа ИЧ-10 (точность измерения 0,001 мм). После достижения условной стабилизации нагрузки на последней ступени нагружения наблюдали за процессом уплотнения смеси во времени с отсчетами через 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 60 мин при постоянной нагрузке.

При испытаниях на торцы образцов во влагонасыщенном состоянии снизу и сверху прикладывали смоченные водой кружки фильтровальной бумаги. Для сохранения влажности образцов и фильтрации воды к ним подводили трубки от двух мерных сосудов, на-

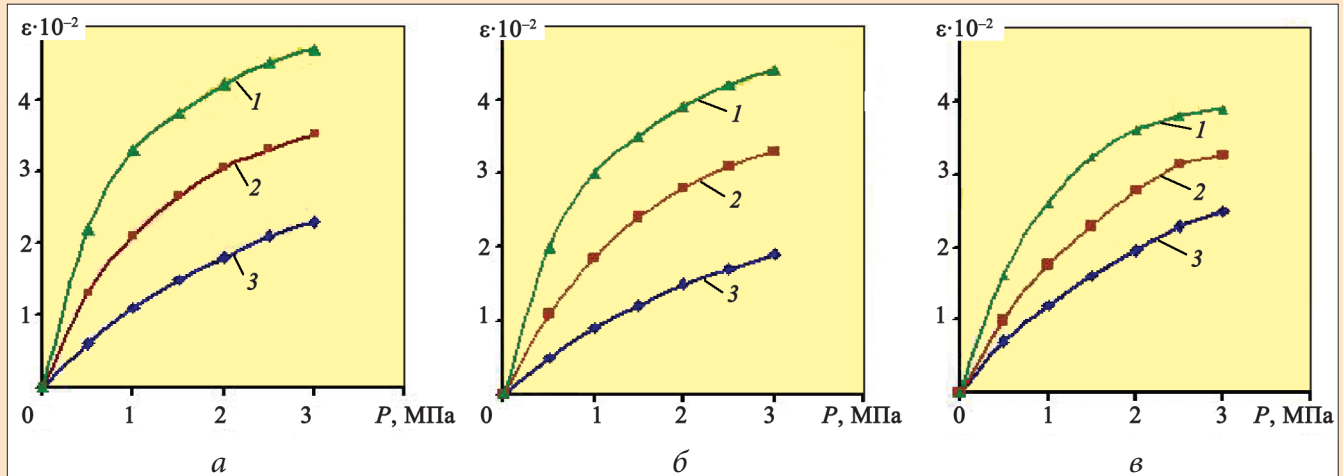


Рис. 2. Зависимость относительной деформации ϵ уплотнения твердеющей смеси от водотвердого отношения (В/Т) и давления прессования P : а, б, в – твердеющие составы 1, 2 и 3; 1 – В/Т = 0,20; 2 – В/Т = 0,15; 3 – В/Т = 0,10.



полненных водой. Абсолютную деформацию ε образца вычисляли как разницу между показаниями индикатора часового типа с поправкой на деформацию компрессионного прибора (в том числе и листов фильтровальной бумаги). Для учета собственных деформаций компрессионного прибора его предварительно тарировали.

По результатам экспериментальных исследований построены компрессионные кривые для каждого состава твердеющей смеси, которые приведены на рис. 2.

Поскольку коэффициент фильтрации K_ϕ и относительное уплотнение зависят от давления прессования, а именно $K_\phi = f(P)$, то показатели коэффициента влагопроницаемости a_p в процессе прессования также будут изменяться.

Решение одномерной задачи прессования (уплотнения) твердеющей смеси с учетом изменения во времени коэффициента влагопроницаемости в уравнении (9) запишем в виде

$$\begin{aligned} \partial P / \partial t &= \partial (a_p \partial P / \partial x) / \partial x = \\ &= (1/\beta_p) (\partial P / \partial x) [K_\phi E_{т.с} (\partial P / \partial x)]. \end{aligned} \quad (13)$$

Уравнение изменения модуля деформации твердеющей смеси в приближенной форме

$$E_{т.с} \approx 50 K_{с.п} \sqrt{P^3}, \quad (14)$$

где $K_{с.п}$ – коэффициент, учитывающий изменение давления прессования и состав твердеющей смеси.

Согласно условиям прессования твердеющей смеси коэффициент фильтрации представим зависимостью [7]

$$K_\phi = 0,03 (P_n / h_c)^{a-1} P_n m_{oc}^2 / (1 - m_{oc})^{3/2}, \quad (15)$$

где P_n – давление окружающей среды (нормальное);
 h_c – высота образца твердеющей смеси;
 m_{oc} – остаточная пористость твердеющей смеси после уплотнения;
 a – коэффициент, учитывающий состав твердеющей смеси.

Для расчета скорости распространения давления прессования в массиве твердеющей смеси примем данные, характеризующие процесс прессования твердеющей смеси в его начале и конце (от 1 до 3 МПа) и рассчитаем коэффициент влагопроницаемости для каждого состава твердеющей смеси с изменяющимся водотвердым отношением (В/Т).

Вначале рассчитаем относительное уплотнение твердеющей смеси в период от начала ее прессования и до конца:

$$e_v^H = \varepsilon_v^H / P_n; \quad e_v^K = \varepsilon_v^K - \varepsilon_v^H / (P_K - P_n). \quad (16)$$

Коэффициент влагопроницаемости до и после прессования твердеющей смеси:

$$a_p^H = K_\phi^H / (m_{ж.ф} e_v^H); \quad a_p^K = K_\phi^K / (m_{ж.ф} e_v^K). \quad (17)$$

Тогда среднее значение коэффициента влагопроницаемости за весь период прессования определим из выражения

$$a_{pcp} = a_p^H + a_p^K / 2. \quad (18)$$

Расчет скорости распространения давления прессования в массиве твердеющей смеси вычислим методом конечных разностей. Тогда для устойчивой аппроксимации введем ограничения с шагом по времени [8]:

$$\Delta \tau \leq \Delta x_i^2 / 2a_p. \quad (19)$$

Задаваясь толщиной слоя твердеющей смеси, например 0,1 м, рассчитаем скорость $v_{пр}$ и время Δt распространения давления прессования в массиве твердеющей смеси, результаты которых сведены в табл. 2.

Из анализа расчетов и результатов экспериментальных исследований следует, что на протяжении процесса прессования твердеющих смесей при изменяющемся В/Т отношении в диапазоне 0,1 – 0,2 для разных составов коэффициент влагопроницаемости существенно изменяется. Так, для всех составов (см. табл. 2) на начало прессования при В/Т = 0,1, коэффициент $a_p = 633 \dots 900 \text{ см}^2/\text{с}$, что свидетельствует о том, что при меньшем содержании воды в смеси создаются условия для более качественного формирования массива смеси с меньшими технологическими усилиями. Это относится и к составу 2, в котором присутствуют более мелкие фракции, их смачивание водой происходит интенсивнее, улучшая фильтрационные характеристики смеси.

Увеличение В/Т отношения до 0,2 ведет к снижению коэффициента влагопроницаемости для всех составов в среднем до 25 % и уменьшению скорости прессования (уплотнения) в 3 раза, что негативно влияет на качество смеси, сроки начала твердения и конца схватывания. Причем в составах, имеющих мелкодробленые фракции (см. табл. 2, составы 2 и 3), независимо то их типа, при В/Т = 0,2 интенсифицируются деформационные процессы, возрастают коэффициент фильтрации и влагонасыщения в испытываемых образцах. В составе 1 (см. табл. 2), имеющем более крупные фракции, при формировании образуются характерные межфракционные пустоты в отличие от составов 2 и 3. В процессе уплотнения смеси (при В/Т=0,1) пустоты уменьшаются, интенсивнее деформируя межфракционные связи и заполняя пространства, что не характерно для водонасыщенного состава (при В/Т=0,2). Это можно объяснить иной геометрией контактов фракций в смеси и действием капиллярных сил.



Таблица 2

Твердеющая смесь	В/Т	ε_v		$\varepsilon_p, \text{МПа}^{-1}$		$K_\phi, 10^{-4}, \text{см/с}$		$a_p, \text{см}^2/\text{с}$		$a_p \text{ ср}, \text{см}^2/\text{с}$	$\Delta t, \text{с}$	$v_{пр}, \text{м/с}$
		нач.	кон.	нач.	кон.	нач.	кон.	нач.	кон.			
Состав 1	0,10	0,011	0,022	0,011	0,0055	7,0	0,57	636,4	103,6	370,0	0,135	0,740
	0,15	0,020	0,033	0,020	0,0065	7,0	0,57	350,0	87,7	218,8	0,228	0,440
	0,20	0,033	0,047	0,033	0,0070	7,0	0,57	212,1	81,4	146,8	0,340	0,294
Состав 2	0,10	0,008	0,0198	0,008	0,0059	7,2	0,62	900,0	105,0	502,5	0,0995	1,000
	0,15	0,0199	0,033	0,020	0,0065	7,2	0,62	360,0	95,4	227,7	0,219	0,456
	0,20	0,030	0,044	0,030	0,0070	7,2	0,62	240,0	88,6	164,3	0,304	0,33
Состав 3	0,10	0,012	0,025	0,012	0,0065	7,6	0,65	633,3	100,0	366,7	0,136	0,735
	0,15	0,018	0,035	0,018	0,0085	7,6	0,65	422,2	76,5	250,0	0,200	0,500
	0,20	0,026	0,042	0,026	0,0080	7,6	0,65	292,3	81,2	186,8	0,267	0,374

Примечание. Обозначено: нач. – начало прессования твердеющей смеси; кон. – конец прессования.

Эксперименты показали, что с увеличением влажности силы сцепления в составах с мелкодробленными компонентами снижаются, а с крупными фракциями растут. Поэтому оптимальное В/Т отношение для разработанных смесей составляет 0,12 – 0,17. Эти технологические показатели при подготовке смеси важны в процессе закладки, когда требуется высокий уровень подготовки закладочного массива в выработанном пространстве угольных и очистных камер рудных шахт. Необходимо учитывать, что при твердении разработанные составы расширяются и создают дополнительные усилия на окружающий массив горных пород, способствуя увеличению сцепления с боковыми породами. Это способствует заполнению отдельных образовавшихся пустот при выемке полезного ископаемого, что исключает возможность бокового расширения (деформации) при росте нагрузки вышележащих пород и разрушении искусственного массива.

Выводы. На основании результатов выполненных исследований предложен метод изучения скорости распространения давления и интенсивности режимов уплотнения (прессования) массива твердеющей смеси путем решения дифференциального уравнения теплопроводности и влагопроницаемости на базе положений термодинамики. Экспериментально определен характер распространения давления в твердеющей смеси в зависимости от ее свойств и параметров коэффициента фильтрации и влагопроницаемости. Рассчитаны скорость и время уплотнения смеси в зависимости от ее свойств и В/Т отношения компонентов в смеси.

Установлено, что с увеличением В/Т отношения в смеси до 0,2 снижаются коэффициент влагопроницаемости в среднем для всех составов до 25 % и скорость прессования (уплотнения) в 3 раза, что негативно влияет на качество формирования закладочного массива, а именно на сроки начала твердения и конца схватывания.

Результаты исследований могут быть учтены при разработке новых технологических приемов формирования закладочного массива в выработанном пространстве и отработанных камерах угольных и рудных шахт, что позволит уменьшить затраты на приготовление смеси, решить вопросы утилизации техногенных отходов и улучшить экологическую обстановку в промышленных регионах страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авраменко С. Х. Ефективні напрямки використання металургійних шлаків / С. Х. Авраменко, Ю. В. Волох // Зб. наук. праць Дніпродзержинського ДТУ: (технічні науки). – 2010. – Вип. 2 (15). – С. 192 – 195.
2. Ляшенко В. И. Совершенствование природоохранных технологий и технических средств для горнорудной промышленности при разработке урановых месторождений // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 4. – С. 92 – 96.
3. Дудар І. Н. Дослідження процесу пресування бетонних сумішей / І. Н. Дудар, В. Л. Дмитренко // Наук. праці Вінницького НТУ. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – С. 1 – 6.
4. Пат. № 81698 Україна, МПК⁶ E21D 21/00, E21F 15/00. Суміш для закладки виробленого простору / А. Ф. Булат, В. Г. Перепелиця, К. С. Іщенко [та ін.]; заявник і власник патенту ІГТМ НАН України. – № а 2006 03724; замовл. 05.04.06; надрук. 25.01.08, Бюл. № 2.
5. Пат. № 81699 Україна, МПК⁶ E21D 21/00, E21F 15/00. Суміш для закладки виробленого простору / А. Ф. Булат, В. Г. Перепелиця, К. С. Іщенко [та ін.]; заявник і власник патенту ІГТМ НАН України. – № а 2006 03725; замовл. 05.04.06; надрук. 25.01.08, Бюл. № 2.
6. Пат. № 86150 Україна, МПК⁶ E21D 21/00, E21F 15/00. Сполука твердіючої суміші / А. Ф. Булат, В. Г. Перепелиця, К. С. Іщенко [та ін.]; заявник і власник патенту ІГТМ НАН України. – № а 2007 09708; замовл. 28. 08. 07; надрук. 25.03.09, Бюл. № 6.
7. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 484 с.
8. Годунов С. К. Разностные схемы / С. К. Годунов, В. С. Рябинский. – М.: Наука, 1977. – 439 с.