

М. А. Завьялов

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД С АСФАЛЬТОБЕТОННЫМИ
ПОКРЫТИЯМИ**

Введение

В работах В.Ф. Бабкова, А. В. Руденского, Ю. М. Ситникова, Ш.Х. Бекбулатова, О.А. Красикова, В.Е. Когановича и др. показано, что мониторинг и обоснованное назначение межремонтных сроков службы дорожных одежд имеет решающее значение для поддержания их долговечности. Однако существующие методики прогнозирования состояния дорожных одежд на основе методов динамического мониторинга не полностью отвечают современным требованиям по поддержанию долговечности.

Процесс разрушения характеризуется тем, что в деформируемом покрытии зарождаются и накапливаются различного рода дефекты и повреждения. Особую важность приобретают исследования процесса разрушения на базе термодинамики, так как энергетические критерии по сравнению с силовыми и деформационными наиболее универсальны, интегрально характеризуют напряженно-деформированное состояние автомобильной дороги. На основании следствий из первого закона термодинамики [15] можно сделать вывод о том, что ни количество работы, ни количество теплоты, ни параметры их определяющие (в том числе тензоры напряжений и деформаций, температура, объем тела и т.д.) или их соотношения не могут быть приняты в качестве параметров повреждаемости и критериев разрушения тела, так как каждый из них в отдельности не является параметром однозначно

и интегрально характеризующим его состояние. В качестве такого параметра должна быть принята удельная величина внутренней энергии или энтропия деформируемого тела.

Поэтому актуальным является создание методики, позволяющей обеспечить еще на этапе строительства долговечность и качество дорожных конструкций и дающей возможность эффективного прогнозирования и обоснования сроков их службы. В общем случае, зная энергетический баланс дорожного покрытия после завершения строительства, можно, оценив изменение термодинамических потенциалов, определить суммарное изменение энергетического баланса дорожного покрытия, а, следовательно, назначить обоснованные сроки предстоящих ремонтов. Методы прогнозирования состояния дорожных одежд, основанные на фундаментальных приложениях термодинамики техногенных систем отличаются от известных методов меньшей затратностью и трудоемкостью процесса мониторинга и повышенной точностью прогнозирования состояния дорожных одежд.

Термодинамическая концепция устройства асфальтобетонного покрытия

Будем рассматривать асфальтобетонное покрытие при строительстве автомобильных дорог как закрытую неизолированную систему, то есть систему, которая может обмениваться энергией с окружающей средой, но не веществом [15]. Исходя из второго закона термодинамики, изменение экстенсивной величины энтропии dS в процессе устройства асфальтобетонного покрытия и его последующего старения можно представить как сумму

$$dS/dt = dS_e/dt + dS_i/dt, \quad (1)$$

где dS_e/dt - поток энтропии, обусловленный взаимодействием с окружающей средой (external);

dS_i/dt - производство энтропии, вследствие процессов, протекающих внутри системы (internal); t - время. То есть, изменение энтропии происходит в результате процессов на границе с внешней средой (поток энтропии) и внутри системы (производство энтропии). Если производство энтропии в соответствии со вторым законом термодинамики неотрицательно, то поток энтропии может быть как положительным, так и отрицательным [17]. Если поток энтропии отрицательный, то отдельные процессы развития системы могут проходить при общем понижении энтропии. Согласно традиционным трактовкам это означает, что в ходе развития системы неупорядоченность будет уменьшаться за счет оттока энтропии.

Поскольку приращение энтропии dS_i , обусловленное изменениями внутри системы, никогда не имеет отрицательного значения, то очевидно, что уменьшение энтропии системы в процессе строительства происходит за счет того, что dS_e имеет отрицательный знак. Отрицательный поток энтропии создается искусственно за счет совершаемой работы по уплотнению смеси и объясняется уменьшением объема асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения, упорядочиванием формируемой структуры, остыванием смеси.

Производство же энтропии на этапе укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси, вследствие относительной кратковременности процессов (по сравнению со сроком службы покрытия), вполне резонно считать равным нулю:

$$dS_i = 0. \quad (2)$$

Тогда процесс устройства асфальтобетонных покрытий описывается следующей системой уравнений [11]:

$$\begin{cases} dS_e < 0; \\ dS_i = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Вероятность того события, что асфальтобетонная смесь самопроизвольно станет асфальтобетонным покрытием, с заданными технологическими параметрами, невелика и, чтобы достичь необходимого значения энтропии, нужно ее понижать. С точки зрения статистического подхода (закон возрастания энтропии - закон возрастания неупорядоченности) можно сказать, что собственно процесс строительства - это движение системы от более вероятного состояния к менее вероятному, а процесс дальнейшего существования покрытия - движение от менее вероятного к более вероятному состоянию системы.

При укладке и укатке асфальтобетонной смеси происходит ее уплотнение. Процесс уплотнения смеси характеризуется совершением механической работы

$$\Delta A = \sum_{i=1}^k F_i \cdot \Delta \varepsilon, \quad (4)$$

здесь ΔA - приращение механической работы (энергии); $\sum_{i=1}^k F_i$ - суммарная нагрузка, действующая на уплотняемую смесь; $\Delta \varepsilon$ - абсолютная деформация смеси; k - количество складываемых сил.

Механическая энергия ΔA , расходуемая на уплотнение смеси, затрачивается на преодоление напряжений сопротивления уплотнению, упорядочиванию текстуры, изменение расстояния между частицами смеси, их перераспределение и т.д. Время утилизации полученной энергии совпадает с периодом релаксации асфальтобетонной смеси, определяемым интервалом времени, за которое напряжения в смеси при фиксированной деформации

падают в e раз (e - основание натурального логарифма). В случае реализации периода релаксации напряжений в асфальтобетонной смеси, при каждом последующем нагружении смесь начинает деформироваться с начального момента контакта с уплотняющим телом, а не с запаздыванием. Запаздывание процесса деформирования происходит, в том случае, когда время тратится на преодоление остаточных упругих напряжений, что имеет место при отсутствии реализации периода релаксации. Как следствие, уменьшение величины абсолютной деформации при повторных нагружениях происходит по линейному закону, если период релаксации реализуется, и имеет нелинейную зависимость в противном случае [6]. В результате работы, производимой уплотняющим агрегатом (механическая энергия), изменяются технологические параметры асфальтобетонной смеси, такие как: плотность, угол внутреннего трения, сцепление, модуль упругости и другие. При укатке, уплотнении асфальтобетонной смеси изменяется ее внутренняя энергия. Этим обусловлен рост модуля упругости и, как следствие, снижение приращений величины абсолютной деформации смеси при стабильных давлениях на уплотняемую поверхность.

Изменение энтропии уплотняемой смеси, происходящей за счет подвода энергии ΔA , можно записать в виде:

$$\Delta S = -\frac{\Delta A}{T} \eta + C \frac{\Delta T}{T}, \quad (5)$$

где ΔS , ΔT - приращения энтропии и температуры, соответственно; C , T - объемная теплоемкость и температура материала, соответственно; η - коэффициент технологичности, $0 \leq \eta \leq 1$. Коэффициент технологичности является индикатором рационального применения технологических операций и материалов: удобообрабатываемости асфальтобетонной смеси [4, 7],

степени реализации периода релаксации напряжений, агрегатной скорости, величины контактного давления и т.д. При идеальном сочетании указанных факторов $\eta \rightarrow 1$, в противном случае η стремится к нулю.

Пусть S_{ρ_n} – величина энтропии, соответствующая нормативной плотности уплотняемой асфальтобетонной смеси. Изменение энтропии в течение всего процесса уплотнения представим, с учетом формулы (5), как

$$S_{\rho_n} - S_{\rho_0} = \sum_{j=1}^n \Delta S_j = -\frac{I}{T} \sum_{j=1}^n \Delta A_j \eta_j + C \ln \frac{T}{T_0}, \quad (6)$$

где S_{ρ_0} – величина энтропии, отвечающая начальному состоянию асфальтобетонной смеси, имеющей плотность ρ_0 ; ΔS_j – приращение энтропии после j -ого цикла уплотнения, $j = 1, 2, \dots, n$; n – количество циклов уплотнения; T_0 – начальная температура смеси.

Качественно степень рационального применения технологических операций и материалов можно интерпретировать следующим графиком (рис.1). Изменение энтропии за весь процесс уплотнения, с учетом формулы (4), запишем в виде

$$S_{\rho_n} - S_{\rho_0} = -\frac{I}{T} \sum_{j=1}^n \Delta \varepsilon_j \eta_j \sum_{i=1}^k F_i + C \ln \frac{T}{T_0}. \quad (7)$$

Задавая начальное значение энтропии S_{ρ_0} , и идеализируя рассматриваемый процесс $\eta_j \rightarrow 1$, $\Delta \varepsilon_j = \Delta \varepsilon \sim \text{const}$, найдем величину S_{ρ_n}

$$S_{\rho_n} = -\frac{\Delta \varepsilon}{T} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^k F_i + C \ln \frac{T}{T_0} + S_{\rho_0}. \quad (8)$$

На основании свойства линейности графика 1 (см. рис.1), запишем уравнение этого графика

$$S = t(S_{\rho_n} - S_{\rho_0})/t_n + S_{\rho_0}, \quad (9)$$

где t - время процесса уплотнения; t_n - время идеального процесса уплотнения, соответствующее значению энтропии S_{ρ_n} . Значение $(S_{\rho_n} - S_{\rho_0})/t_n$ является угловым коэффициентом линии 1 (см. рис.1). Определив время t , можно рассматривать формулу (9) как аналитическое представление зависимости изменения энтропии от времени идеального процесса. То есть,

$$\lim_{t \rightarrow t_n} S(t) = S, \quad (10)$$

здесь величина S определяется согласно уравнению (9).

Величина изменения энтропии $S_{\rho_n} - S_{\rho_0} = \delta S$ для удобообрабатываемой смеси выражается через показатель степени уплотняемости асфальтобетонной смеси $b_j = \frac{\rho_{j-1}}{\rho_j}$ и количество циклов уплотнения n , где

ρ_j - значение плотности смеси после j -ого цикла уплотнения. Действительно, основываясь на научной гипотезе [5] о линейности зависимостей величин b_j от затрачиваемой на

уплотнение смеси энергии (рис.2) и дискретности процесса уплотнения, представим изменение $\Delta \varepsilon$ по закону убывающей арифметической прогрессии с разностью m , определяемой производной

$$m = \frac{d \Delta \varepsilon}{d \delta S}, \quad (11)$$

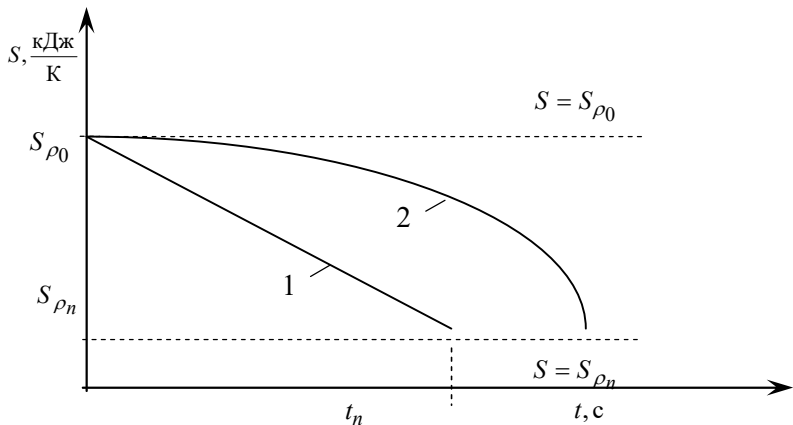


Рисунок 1 - Зависимости изменения энтропии от времени процесса уплотнения асфальтобетонной смеси и величины коэффициента технологичности:
 1 - при высоком η ; 2 - при низком η

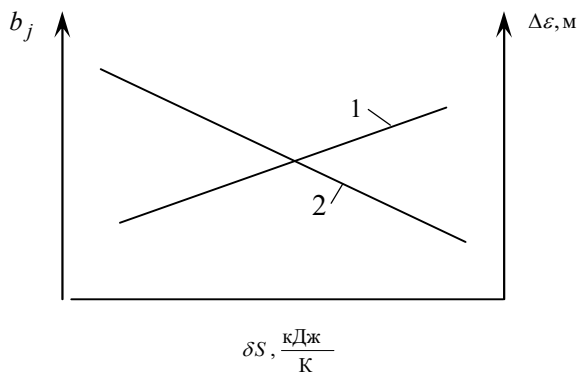


Рисунок 2 - Характер зависимостей величин показателя степени уплотняемости асфальтобетонной смеси b_j (линия 1) и абсолютной деформации смеси $\Delta \epsilon$ (линия 2) от приращения энтропии δS

где d - дифференциал. Тогда количество циклов уплотнения определим по формуле:

$$n = 1 + (\Delta\varepsilon_n - \Delta\varepsilon_1)/m, \quad (12)$$

здесь $\Delta\varepsilon_n$ и $\Delta\varepsilon_1$ - величины абсолютной деформации после первого и последнего цикла уплотнения смеси, соответственно. Причем, как следует из свойств арифметической прогрессии, величины $\Delta\varepsilon_n$ и $\Delta\varepsilon_1$ связаны следующей формулой:

$$\Delta\varepsilon_n = \Delta\varepsilon_1 + m(n-1). \quad (13)$$

Величину $\Delta\varepsilon_j$ можно, в свою очередь определить по формуле [6]:

$$\Delta\varepsilon_j = h\alpha(1 - b_j), \quad (14)$$

где α - коэффициент пропорциональности; h - толщина укладываемого слоя.

Изменение энтропии δS с учетом формул (7), (12) - (14), запишем, как

$$\delta S = S_{\rho_n} - S_{\rho_0} = \frac{1}{2}nh\alpha(2 - (b_n + b_1))\sum F_i + C \ln \frac{T}{T_0}. \quad (15)$$

В этой формуле первое слагаемое, обозначим его δS_ρ , характеризует изменение энтропии асфальтобетонной смеси вследствие ее уплотнения, второе слагаемое, обозначим его δS_T , интерпретирует изменение величины энтропии смеси в зависимости от изменения температуры.

Общее изменение величины энтропии можно записать

$$\delta S = \delta S_\rho + \delta S_T. \quad (16)$$

Таким образом, можно выдвинуть научную гипотезу: мерой рационального применения технологических операций и окончания строительства является условие

достижения асфальтобетонным покрытием
неравновесного стационарного состояния.

Энергетический баланс дорожной одежды

В классической термодинамике для исследования приращения энергии в различных системах наряду с другими методами применяется метод термодинамических потенциалов, предложенный Дж. В. Гиббсом [2]. Его сущность состоит в том, что для термодинамической системы подбираются такие функции состояния, изменение которых при вариации состояния системы адекватно линейной комбинации изменений отдельных ее параметров.

Под энергетическим балансом термодинамической системы будем понимать совокупность значений в рассматриваемый момент времени трех функций состояния, называемых характеристическими или термодинамическими потенциалами: G - энергия Гиббса; F - энергия Гельмгольца или свободная энергия; H - энтальпия.

Дорожное покрытие - это термодинамическая, инженерно-геологическая система, состояние которой характеризуется температурой T , давлением p , объемом V , внутренней энергией U и энтропией S .

Согласно первому началу термодинамики внутренняя энергия U определяется разностью между количеством теплоты Q , которую тело получает и работой A , которую тело совершает (знак «-») или которая совершается над рассматриваемым телом (знак «+»):

$$U = Q \pm A. \quad (17)$$

Закон сохранения энергии, интерпретируемый формулой (17), имеет место при любых температурных и эксплуатационных режимах дорожного покрытия. Следовательно, часть кинетической энергии

транспортного средства преобразуется при контакте с дорожным покрытием, в силу диссипативности системы «дорожное покрытие - транспортное средство», в тепловую энергию. Тепловая энергия в свою очередь реализуется во внутреннюю энергию дорожного покрытия и на совершение работы по деформации дорожной одежды.

С течением времени внутренняя энергия, растрачиваясь на упруго-пластичные восстановительные процессы, начинает убывать. И здесь наряду с восстановительными процессами, интенсивностью и грузонапряженностью движения значительное влияние на уменьшение запасов внутренней энергии оказывает перепад внешних температур.

Исходя из формулы [1, 15]

$$H = U + pV \quad (18)$$

понижение внутренней энергии U ведет к уменьшению энтальпии H , допуская, что произведение pV - const.

Учитывая тот факт, что процессы старения асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог сопровождается ростом его энтропии [10] можно заключить, что будут убывать как свободная энергия материала F , так и энергия Гиббса G , поскольку рассматриваемые величины связаны следующими зависимостями [1, 15]:

$$F = U - TS, \quad (19)$$

$$G = H - TS. \quad (20)$$

Из формул (19) и (20) следует также, что

$$G = F + pV. \quad (21)$$

Формулу (17) с учетом диссипативности системы «дорожное покрытие - транспортное средство», запишем в виде

$$U = (I + k)A, \quad (22)$$

где k - коэффициент диссипативности, равный:

$$k = Q/A, \quad (23)$$

то есть отношению количества теплоты Q к величине работы A , совершаемой над поверхностью покрытия в результате трения.

Коэффициент диссипативности k зависит от температуры окружающего воздуха \tilde{T} и состояния асфальтобетонного покрытия, например, характеризующимся коэффициентом пластичности ξ , представляющим отношение полного прогиба конструкции ε при нагружении к упругому ε_e . Формально эту зависимость, которую необходимо установить экспериментально, запишем как

$$k = k(\tilde{T}, \xi). \quad (24)$$

В силу второго закона термодинамики $k < 1$, поэтому дополнительная внутренняя энергия, получаемая дорожным покрытием, вследствие его контакта с транспортным средством, всегда меньше той диссипативной работы, которую совершает над покрытием автомобильной дороги транспортное средство. По этой причине в процессе эксплуатации автомобильной дороги первоначальный уровень внутренней энергии покрытия постепенно иссякает, несмотря на регулярную «подпитку» со стороны транспортных средств и температурных колебаний, расходуясь на компенсационную работу по восстановлению упруговязкопластичных деформаций, возникающих опять же в результате контакта с транспортным средством и температурных колебаний.

При старении дорожного покрытия, а, следовательно, и убывании величины свободной энергии F , коэффициент диссипативности k возрастает. Диструкционные процессы, сопровождающие старение дорожного покрытия, приводят к повышению его объемной теплоемкости.

Поэтому, несмотря на увеличение коэффициента диссипативности, эффективность теплообмена системы «дорожное покрытие - транспортное средство» по мере старения покрытия снижается. В результате уменьшается интенсивность подпитки внутренней и свободной энергии дорожного покрытия, ухудшается кумуляция тепловой энергии и, в конечном счете, снижается уровень термодинамических потенциалов Гиббса, характеризующих энергетический баланс дорожного покрытия.

В роли основного показателя, характеризующего состояние дорожной одежды можно выбрать степень прочности. Степень прочности количественно оценивается значением коэффициента прочности, представляющим собой отношение фактического модуля упругости дорожной одежды к расчетному [16].

Однако при такой оценке долговечности по степени прочности не учитывается динамика кумуляции остаточных деформаций, изменение отношения остаточной и упругой компонент деформации в процессе старения дорожной одежды. Ведь в реальных условиях дорожная одежда испытывает многократные нагружения с накоплением остаточных деформаций, что приводит к снижению ровности покрытия. Известны эмпирические зависимости снижения ровности покрытия при эксплуатации [18, 19], но показатель ровности является лишь внешним проявлением внутренних процессов, происходящих в дорожной одежде, и только косвенно оценивает ее состояние, не указывая на остаточный ресурс.

При рассмотрении процессов старения дорожной одежды с учетом техногенеза [8] необходимо анализировать весь спектр факторов, определяющих ее энергетическое состояние. Поэтому наряду с коэффициентом прочности для интегральной оценки степени деградации дорожной одежды следует использовать коэффициент пластичности - параметр, характеризующий работоспособность и долговечность.

Коэффициент пластичности устанавливает соотношение между пластической и упругой компонентами деформации сжатия. Обладая способом аналитического определения значения этого коэффициента в заданный момент времени и коррелируя полученное значение с уровнем энергетических потенциалов дорожной одежды, можно установить степень старения последней.

Известно, что при загрузке образцов дорожно-строительных материалов напряжениями меньшими, чем предел прочности, обязательно в общих деформациях сжатия можно выделить упругую (обратимую) и пластическую (остаточную) деформации. То есть общую относительную деформацию сжатия ε можно представить в виде суммы

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{pl}, \quad (25)$$

где ε_e , ε_{pl} - соответственно упругая и пластическая деформации.

Тогда выражение коэффициента пластичности ξ , представляющего отношение полного прогиба дорожной одежды при нагружении к его упругой составляющей, приобретет вид

$$\xi = \varepsilon / \varepsilon_e = 1 + \varepsilon_{pl} / \varepsilon_e, \quad (26)$$

Из формул (25) и (26) следует, что отношение полного прогиба дорожной одежды к величине пластической (остаточной) деформации можно также выразить через коэффициент пластичности следующей формулой:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pl}} = \frac{\xi}{\xi - 1}. \quad (27)$$

Учитывая тенденцию накопления остаточной деформации от последовательных приложений нагрузки [20] $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3 > \dots > \varepsilon_n$ (эти деформации, последовательно накладываясь, формируют полную пластическую деформацию), величину коэффициента пластичности ξ

представим в виде частичной суммы числового ряда [12]:

$$\xi = 1 + \sum_{n=1}^N \frac{\alpha^n}{n!}, \quad (28)$$

где α - коэффициент, зависящий от свойств дорожной одежды, $0 < \alpha < 1$; N - число выносливости или число нагружений материала до полного разрушения; n - число реализованных нагружений.

В работе [13] построен алгоритм, впервые позволяющий аналитически определить предельное значение коэффициента пластичности дорожной одежды, соответствующего реализации числа выносливости, а также проследить динамику накопления остаточной деформации в зависимости от числа нагружений и значения величины упругой деформации. Получено числовое значение величины коэффициента пластичности, которое может служить критериальным показателем состояния дорожной одежды.

Рассматривая процесс строительства автомобильной дороги с учетом техногенеза [8], а дорожную одежду как термодинамическую, инженерно-геологическую систему, приходим к необходимости для оценки эксплуатационных качеств дорожной одежды определять значения термодинамических потенциалов ее материала.

За начальное значение внутренней энергии U_0 дорожной одежды примем суммарную работу, совершаемую над дорожной одеждой транспортом за период времени от завершения строительства до начала утраты упругих свойств последней. Иначе говоря, начальное значение внутренней энергии (начальный потенциал) эквивалентен той суммарной работе транспортных средств, которую они совершают над дорожной одеждой, до тех пор, пока она сохраняет, за счет начального потенциала, упругие свойства. Момент начала потери этих свойств характеризуется снижением

величины внутренней энергии дорожной одежды. Определение же суммарной работы транспортных средств за указанный период времени в зависимости от категории дороги и особенностей ее эксплуатации представляется вполне реальным.

Получим аналитическое выражение коэффициента диссипативности в виде функции термодинамических потенциалов Гиббса. Для этого установим количество теплоты Q , подводимой к поверхности покрытия в процессе контакта последнего с транспортным средством. Определим теперь скорость подводимой теплоты, исходя из неравенства [14]

$$Q^i - Q^e \geq 0, \quad (29)$$

где Q^i и Q^e - скорости притока теплоты и подвода внешней теплоты, соответственно; в данном случае $Q^e = \dot{Q}$, здесь $\dot{\bullet} \equiv \frac{d}{dt}$ - оператор дифференцирования по времени.

Из нестроого неравенства (29) следует, что скорость притока теплоты в систему не меньше скорости оттока теплоты из окружающей среды.

Записав первое начало термодинамики в виде

$$U = Q + A \quad (30)$$

и продифференцировав его по времени, получим

$$\dot{U} = Q^e + \dot{A}. \quad (31)$$

С другой стороны

$$Q^i = \dot{S} T. \quad (32)$$

С учетом формул (31) и (32) неравенство (29) можно записать в форме

$$\dot{A} - \dot{U} + T \dot{S} \geq 0. \quad (33)$$

Используем соотношение между характеристическими функциями

$$U = F + T S, \quad (34)$$

Дифференцируя равенство (34) и подставляя полученный результат в неравенство (33), получим

$$\dot{A} - \dot{F} - \dot{T} S \geq 0. \quad (35)$$

Рассмотрим случай, когда в выражении (29) стоит знак равенства, соответственно в равенства превратятся и нестрогие неравенства (33) и (34). Тогда из выражения (35), получим

$$\dot{A} = \dot{F} + \dot{T} S. \quad (36)$$

Интегрируя обе части уравнения (36), можно записать

$$A = F + T S. \quad (37)$$

Из условия равенства левой части выражения (29) нулю следует также, что

$$Q^e = Q^i. \quad (38)$$

Или с учетом (32)

$$Q^e = \dot{Q} = \dot{S} T. \quad (39)$$

Интегрируя, выражение (39) получим

$$Q = S T. \quad (40)$$

После подстановки формул (37) и (40) в выражение (23) коэффициент диссипативности приобретает вид

$$k = TS / (F + TS). \quad (41)$$

Или с учетом формулы (34) получаем

$$k = TS / U. \quad (42)$$

Вычислив начальное значение коэффициента диссипативности k_0 экспериментально, либо в лабораторных условиях, либо непосредственно на объекте после завершения строительства, можно при выбранной начальной температуре T_0 определить начальный уровень энтропии дорожной одежды

$$S_0 = k_0 U_0 / T_0. \quad (43)$$

В этом случае величину энтропии запишем как

$$S = C \ln \frac{T}{T_0} + S_0. \quad (44)$$

Учитывая тот факт, что по мере старения дорожной одежды возрастает удельная теплоемкость ее материала и коэффициент пластичности ξ , логично сделать следующее допущение: объемная теплоемкость дорожной одежды пропорциональна коэффициенту пластичности, то есть

$$C = \lambda \xi, \quad (45)$$

где λ - коэффициент пропорциональности.

Тогда с учетом формулы (45) выражение (44) приобретет вид

$$S = \lambda \xi \ln \frac{T}{T_0} + S_0. \quad (46)$$

Определив вариацию энтропии

$$\delta S = S - S_0 = \lambda \xi \ln \frac{T}{T_0} \quad (47)$$

согласно [9], получим выражение коэффициента пропорциональности

$$\lambda = \delta S / \xi \ln \frac{T}{T_0}. \quad (48)$$

Значение же λ вычислим из начального условия $\xi = 1$, действительно после завершения строительства дорожная одежда упруга, а значит коэффициент пластичности ξ , представляющего отношение полного прогиба дорожной одежды при нагружении к его упругой составляющей, равен 1. Тогда значение коэффициента пропорциональности вычислим по формуле

$$\lambda = \delta S / \ln \frac{T}{T_0}. \quad (49)$$

В результате получаем возможность определять значение энтропии при данной температуре T в зависимости от числа нагружений n , поскольку в работе [12] установлена аналитическая зависимость ξ от n

$$\xi = 1 + \frac{\alpha}{1!} + \frac{\alpha^2}{2!} + \dots + \frac{\alpha^n}{n!} + \frac{e^{\theta\alpha} \alpha^{n+1}}{(n+1)!}. \quad (50)$$

здесь $0 < \theta < 1$; α - определяемый коэффициент, зависящий от свойств дорожной одежды и условий эксплуатации, $0 < \alpha < 1$; e - основание натурального логарифма.

Аналогично представим выражение внутренней энергии дорожной одежды в виде

$$U = \frac{U_0}{\xi} + k A. \quad (51)$$

Подставляя в выражение (51) формулу (42) и решая получившееся уравнение относительно U , будем иметь

$$U = \frac{U_0}{2\xi} + \left(\left(\frac{U_0}{2\xi} \right)^2 + T S A \right)^{1/2}. \quad (52)$$

Подставляя выражение (52) в формулу (34), получим выражение величины свободной энергии дорожной одежды в виде

$$F = \frac{U_0}{2\xi} + \left(\left(\frac{U_0}{2\xi} \right)^2 + T S A \right)^{1/2} - T S. \quad (53)$$

Определив такие базисные термодинамические потенциалы как U и S , нетрудно установить значение энтальпии H и энергии Гиббса G , используя формулы (18) и (20). Величину pV определим экспериментально после завершения строительства дорожной одежды,

далее считая p и V обратно пропорциональными величинами, рассматриваем pV как константу.

Установлено [3, 15], что для различных вариантов термодинамических условий того или иного процесса в инженерно-геологической системе самопроизвольно могут протекать только те процессы, которые сопровождаются уменьшением соответствующего термодинамического потенциала. Термодинамический потенциал Гиббса G будет снижаться за счет уменьшения энтальпии. Причиной уменьшения энтальпии, в свою очередь, является падение внутренних напряжений (давлений) p и расход энергии U на изменение структуры материала покрытия, в результате чего и достигается падение внутренних напряжений - релаксация.

Исходим также из принятой гипотезы [9] о том, что вариации энтропии при строительстве дорожной одежды и ее эксплуатации равны по модулю

$$|\delta S_c| = |\delta S_{ex}|, \quad (54)$$

здесь δS_c , δS_{ex} - соответственно вариации энтропии при строительстве и эксплуатации дорожной одежды.

Иначе говоря, полное разрушение материала дорожной одежды наступает при выполнении условия (54). Поэтому, оценив вариацию энтропии в заданный момент времени, можно определить энергетический уровень других термодинамических потенциалов, а также судить о степени износа и старения дорожной одежды.

Выводы

1. Показано, что, зная энергетический баланс дорожного покрытия после завершения строительства, можно, оценив изменение термодинамических потенциалов, определить суммарное изменение

энергетического баланса дорожного покрытия, а, следовательно, назначить обоснованные сроки предстоящих ремонтов.

2. Выдвинута научная гипотеза: мерой рационального применения технологических операций и окончания строительства является условие достижения асфальтобетонным покрытием неравновесного стационарного состояния.

3. Разработана методика и построен алгоритм, позволяющие осуществлять аналитический мониторинг уровня термодинамических потенциалов материала дорожной одежды, что дает возможность обоснованно назначать сроки ремонтных работ.

Литература

1. Базаров И.П., Геворкян Э.В., Николаев П.Н. Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. - М.: Изд-во МГУ, 1989. - 240 с.

2. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. М.: Наука, 1982. - 584 с.

3. Гуров К.П. Феноменологическая термодинамика необратимых процессов (физические основы). - М.: Наука, 1978. - 128 с.

4. Завьялов М. А. О взаимосвязи удобоукладываемости асфальтобетонной смеси с энергоемкостью операции по её укладке // Известия вузов. Строительство. 2001. №6. С. 74-77.

5. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Влияние удобоукладываемости асфальтобетонной смеси на энергоемкость процесса уплотнения // Строительные и дорожные машины. - 2002. - №1. - С. 14-16.

6. Завьялов М.А. Энергетическая функция процесса уплотнения асфальтобетонной смеси // Строительные и дорожные машины. - 2003. - №3. - С. 19-21.

7. Завьялов М.А. Принцип обеспечения удобообрабатываемости асфальтобетонной смеси // Известия вузов. Строительство. - 2003. - №6. - С. 79-82.

8. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Техногенный подход к процессу устройства асфальтобетонных покрытий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2003. - №11. - С. 16-17.

9. Завьялов М.А., Завьялов А. М. Зависимость межремонтных сроков службы асфальтобетонного покрытия от вариации энтропии в процессе строительства // Известия вузов. Строительство. - 2004. - №9. - С.73-77.

10. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Процесс устройства асфальтобетонного дорожного покрытия и метод термодинамических потенциалов Гиббса // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2004. - №9. - С.67.

11. Завьялов М.А. Термодинамические аспекты устройства и старения асфальтобетонных покрытий // Вестник СибАДИ. - Вып. 2. - 2005. - С. 61-62.

12. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Энергетический баланс дорожного покрытия // Известия вузов. Строительство. - 2005. - № 6. - С. 73-78.

13. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Определение значения коэффициента пластичности дорожной одежды // Известия вузов. Строительство. - 2006. - № 1. - С. 69-73.

14. Ключников В.Д. Физико-математические основы прочности и пластичности. - М.: Изд-во МГУ, 1994. - 189 с.

15. Королев В.А. Термодинамика грунтов. - М.: Изд-во МГУ, 1997. - 168 с.

16. ОДН 218.0.006-2002. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог (взамен ВСН 6-90). - М.: Информавтодор, 2002. - 139 с.

17. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов. - М.: Изд-во Иностран. лит., 1960. - 127 с.

18. Ремонт и содержание автомобильных дорог: Справочник инженера дорожника / Под ред. А.П. Васильева. - М.: Транспорт, 1989. - 287 с.

19. Слободчиков Ю.В. Проектирование ремонтных и ремонтно-восстановительных работ на автомобильных дорогах с использованием ЭВМ. - М.: Информавтодор, 1999. - 124 с.

20. Смирнов А.В., Малышев А.А., Агалаков Ю.А. Механика устойчивости и разрушений дорожных конструкций. - Омск: Изд-во СибАДИ, 1997. - 91 с.