

Утилизация нефтяных шламов химическим методом основана на их смешивании с химическими реагентами, например негашеной известью, вступающей в реакцию с водой, добавленной в смесь с образованием гидроксида кальция, адсорбирующего нефть (нефтепродукты). Реакция проходит с выделением большого количества теплоты, при этом образовавшиеся частицы спекаются (капсулируются) и конечным продуктом обезвреживания нефтешламов является гидрофобное сыпучее инертное вещество, безопасное для окружающей природной среды. Одним из основных факторов, обуславливающих качество утилизации нефтешламов данным способом, является обеспечение равномерного распределения компонентов в формируемой смеси. Распределение компонентов носит случайный характер с множеством возможных состояний, которые могут описываться с помощью методов теории информации, центральное место в которых занимают понятия информационной энтропии или количества информации. С одной стороны энтропия оценивает неупорядоченность распределения частиц в смеси, т.е. является мерой неопределенности, с другой стороны энтропия является мерой количества информации, равной разности априорной и апостериорной неопределенности (энтропии). Дисперсия случайной величины запишется в виде  $\sigma^2 = \sum_{i=1}^n p_i x_i^2 - (\sum_{i=1}^n p_i x_i)^2$ , (1) где  $\sigma^2$  – значение случайной величины,  $p_i$  – вероятность случайной величины с условием нормировки вероятностей, (2) Согласно формализму Джейнса [1] информационная энтропия непрерывного множества определяют по выражению  $H = -\int_{-\infty}^{\infty} p(x) \ln p(x) dx$ , (3) и требуется найти такую функцию плотности распределения  $p(x)$ , которая бы соответствовала максимальному значению энтропии при выполнении условий (1) и (2). Решением этой задачи является выражение вида  $p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$ , (4) т. е. это выражение нормального закона распределения вероятности случайной величины. При обезвреживании НШ химическим методом проблематично определение эффективности смешивания на основе расчетной концентрации, поэтому были проведены экспериментальные работы по смешиванию не взаимодействующих друг с другом сыпучих материалов [2]: промытого от глины, просушенного, просеянного речного песка и поваренной соли. В качестве случайной величины можно принять концентрацию любого из компонентов, в данном случае были определены концентрации соли в отобранных пробах. После отбора проб, определения концентраций, построения гистограммы по критерию Пирсона была проверена гипотеза о нормальном распределении случайной величины (концентрации). Сравнение эмпирических и теоретических частот при уровне значимости 0,05 показало, что они отличаются незначимо, и была принята гипотеза о нормальном распределении генеральной совокупности [3]. Макаров [4] для оценки качества формирования многокомпонентной смеси предложил критерий F, вычисляемый по формуле:  $F = \frac{H_{max} - H_{exp}}{H_{max}}$ , (5) где  $H_{max}$  – соответственно, максимально-возможная энтропия и энтропия опыта. Энтропию находят по формуле:  $H = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$ , (6) Рис. 1 - Зависимость энтропии от концентрации где  $p_i$  – вероятность нахождения

частиц, первого и второго компонента соответственно в произвольно взятой пробе. При этом участвующие в процессе смешивания сыпучие материалы принимаются в виде шарообразных частиц одинакового размера. В действительности, как известно, форма и размеры частиц могут быть одинаковыми лишь у так называемых монодисперсных сыпучих материалов, сравнительно редко применяющихся на производстве. В работе Майкова [5] приведены результаты расчета коэффициента атермальности (неидеальности) сыпучих материалов на основе статистического вывода функции условной энтропии. При этом происхождение атермальности обусловлено только различием объемов частиц компонентов смеси и при этом также принимают, что частицы имеют шарообразную форму. Энтропия многокомпонентной атермальной однофазной системы представлена в виде (6) где  $x_i$  – массовая доля  $i$ -го компонента (аналог вероятности обнаружения частицы  $i$ -го типа),  $H_i$  – условная энтропия, относящаяся к  $i$ -му компоненту,  $n_i$  – натуральное целое число. В данном выражении первый член правой части представляет собой шенноновскую энтропию смешения идеальной системы, а второй член среднюю условную энтропию. Формула для вычисления условной энтропии  $i$ -го компонента для бинарной системы аналогична выражению (6), но с той разницей, что  $x_i$  и  $H_i$  – это условные вероятности. Расчет коэффициентов бинарной атермальности в зависимости от отношений объемов частиц и проводился по следующим выражениям (8) (9) где  $V_1$ ,  $V_2$  – относительные объемы частиц, составляющих бинарную смесь. Сопоставление результатов расчета энтропии, полученных при разных концентрациях компонентов бинарной смеси ( $V_1, V_2$ ), представленное в виде графиков на рис., показывает, что значения энтропии, рассчитанные по модели Макарова (формула 6) примерно на 30% превышают рассчитанные по Майкову (7), что свидетельствует об уменьшении неопределенности, когда имеется дополнительная информация, в частности, задана атермальность смеси. Результаты приведены для компонентов смеси, частицы которых имеют одинаковые формы и объемы, т.к. учет атермальности возможен только при расчете согласно (7). Однако в отличие от (7), с использованием (6) возможно проведение расчетов с учетом изменения последовательности смешивания компонентов. Рассмотрим данную «полезную» особенность (6) на примере формирования трехкомпонентной смеси, что сопоставимо с химическим методом обезвреживания нефтесодержащих грунтов (НСГ), когда смешивают НСГ (компонент А), негашеную известь (В) и модификатор (С). Как известно, при смешивании компонентов энтропия смеси возрастает, а при разделении смеси на компоненты уменьшается. В качестве примера рассмотрим смесь с заданными долями компонентов:  $x_A = 0,70$ ;  $x_B = 0,25$ ;  $x_C = 0,05$  и рассчитаем энтропии всех возможных комбинаций загрузки и смешивания с использованием информационной энтропии дискретного множества, применяя, как и при подходах, рассмотренных выше, двоичные логарифмы для выражения

полученных результатов в битах. В табл. представлены рассчитанные значения информационной для различных последовательностей смешивания: в 1-м опыте одновременно загружаются и смешиваются все три компонента; во 2-м опыте первоначально формируется смесь (A + B), а затем к ней добавляют компонент C и т.д. При расчете доли компонентов в промежуточных стадиях принимались с учетом их доли в смеси. Как видно из представленного примера (доли могут быть различны), наибольшая информационная энтропия (1,08 бит), следовательно, и наибольшая эффективность смешивания может быть достигнута при загрузке и смешивании всех трех компонентов одновременно (опыт № 1). Таблица 1 - Значения энтропии в зависимости от способа смешивания № Последовательность смешивания , бит

№	Последовательность смешивания	бит
1	A + B + C	1,08
2	(A1 + B1) + C	1,05
3	(A2 + C1) + B	0,85
4	(B2 + C2) + A	1,01

При поэтапной загрузке высокой эффективности можно достичь, когда первоначально смешиваются близкие по долям компоненты (опыт № 2, 4) и, соответственно, наименьшее значение (0,85 бит) получено, когда первоначально смешиваются компоненты, наиболее отличающиеся по долям в смеси. Следовательно, если для формирования смеси используются компоненты с различными долями, то для получения однородной смеси при прочих равных условиях, первоначально необходимо смешивать близкие по долям компоненты, а для увеличения вероятности равномерного распределения частиц компонента с меньшей долей во всей смеси, необходимо повысить его дисперсность. Таким образом, информационную энтропию, как меру неопределенности, можно применять для повышения эффективности формирования смеси, в том числе при утилизации нефтешламов, особенно в случаях, когда компоненты, участвующие в процессе смешивания, существенно отличаются по долям в смеси и (или) по размерам частиц.