

ческих свойств и, следовательно, величины расчётных параметров для проектирования инженерных сооружений.

Для обоснования возможности применения ЗШС в строительстве необходимо изучить деформационные характеристики этого техногенного грунтового материала, сравнить с параметрами природных грунтов, использующихся в регионе. На базе полученных данных планируется разработать математические модели, позволяющие обоснованно назначать расчётные показатели этого техногенного грунта при проектировании насыпей для вертикальной планировки под строительные площадки и земляное полотно автомобильных дорог.

В ходе исследований были выполнены следующие эксперименты:

- определение модуля деформации на компрессионных приборах при различных значениях влажности и степени уплотнения ЗШС;
- определение модуля упругости на компьютеризированном прессе при различных значениях влажности и степени уплотнения ЗШС;
- проведения консолидировано-дренированных испытаний ЗШС в приборе трехосного сжатия при различных значениях влажности и степени уплотнения.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование модуля деформации ЗШС осуществляли на компрессионном приборе КПр-1М, в соответствии с методикой ГОСТ 12248-2010 [4]. Образцы изготавливали в форме большого прибора стандартного уплотнения аналогично методике испытаний, описанной в ГОСТ 22733-2002 [5], варьируя степень уплотнения числом ударов груза этого прибора.

Зависимость модуля упругости ЗШС от влажности и степени уплотнения определяли по методике рычажного прессы, изложенной в ВСН 29-76 [6]. Уплотнение образца в форме осуществляли с помощью гири от большого прибора стандартного уплотнения. Поскольку диаметр формы больше, чем наковальни, грунт уплотняли послойно, перемещая её по схеме, применяемой в тесте «А» метода Проктора [7, 8]. Контроль плотности и влажности осуществляли взвешиванием формы, заполненной грунтом, и отбором проб для определения влажности по ГОСТ 5180-2015 [9].

В качестве нагружающего устройства при определении модуля упругости ЗШС использовали универсальную машину AL-7000 LA 10,

позволяющую прикладывать ступенчатую статическую нагрузку к деформируемому образцу. Нагрузку передавали посредством штампа диаметром 3,56 см, площадью 10 см². Осадки измерялись с помощью индикаторов часового типа и путем контроля перемещения штока универсальной машины, что увеличило точность измерений. На рисунке 1а изображена форма для испытаний с установленным штампом до закрепления индикаторов, а на рисунке 1б след от штампа после разгрузки.

Нагружение осуществляли до уровня напряжений, при которых начинали проявляться интенсивные пластические деформации, после чего производили разгрузку и измеряли упругие деформации на поверхности образца.

Испытания на трехосное сжатие ЗШС проводили по методике [4]. Изготовление образцов выполняли путем формовки монолита грунта в большом приборе стандартного уплотнения и последующей забивки гильзы в массив. Извлеченный образец помещался в герметичную резиновую оболочку (рисунок 2а). После чего устанавливалась камера прибора, в неё заливали дистиллированную деаэрированную воду и подавали боковое давление (рисунок 2б).

Эти испытания проводили по консолидировано-дренированной схеме, в стабилометре типа «А» при боковом давлении 100 кПа. Деформации, давление в камере и поровое давление фиксировали датчиками комплекса АСИС. Ступени вертикального нагружения и время стабилизации деформаций выбирали как для пылеватых песков в соответствии с [4].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рисунке 3 представлены результаты определения модуля деформации образцов ЗШС в компрессионном приборе в зависимости от коэффициента уплотнения и влажности этого материала.

На графике (рисунок 3а) виден прирост величины модуля деформации при увеличении коэффициента уплотнения ЗШС (росте плотности скелета грунта). Мы объясняем это увеличением количества контактов частиц в структуре грунта, что ведет к снижению контактных напряжений и уменьшает сминание малопрочных агрегатов. Более значительный прирост модуля деформации в условиях компрессионного прибора при нагрузке 300 кПа связан с таким состоянием грунта, при котором не происходит переупаковки частиц за



Рис.1. Определение модуля деформации ЗШС:
а – образец в нагружающем устройстве; б – след от штампа

счет скольжения агрегатов, а осадка может объясняться разрушением частиц плотно заземленных в своих положениях.

Исследование ЗШС с разной влажностью указывает на снижение компрессионного модуля деформации с ростом влажности. При увеличении влажности вода раздвигает частицы ЗШС, что ослабляет их структурные связи. Кроме того, увеличение толщины водных пленок способствует увеличению осадок, т.к. их деформативность, выше, чем у зольных частиц.

Изменение значения модуля упругости ЗШС в зависимости от коэффициента уплотнения приведены на рисунке 4а, в зависимости от влажности на рисунке 4б.

Как известно, в процессе уплотнения происходит более компактная упаковка частиц за счет местных сдвигов и соскальзывания мелких частиц в поры между более крупными, что повышает сопротивление сдвигу в грунте.

При максимальном уплотнении эти сдвиги практически затухают, и грунт начинает работать в стадии обратимых деформаций. Чем выше коэффициент уплотнения, тем более плотная структура скелета грунта, а значит, распределение нагрузки произойдет на большее число точек контакта. Помимо увеличения структурной прочности это снижает общую деформативность материала, чем и обусловлен рост модуля упругости [10].

Методика испытаний при разной влажности предусматривала работу грунта при т.н. «бытовой» плотности (что примерно соответствует коэффициенту уплотнения ЗШС 0,95). В противоположность уплотнению, повышение влажности грунта вызывает разуплотнение скелета, причем, чем выше влажность, тем сильнее негативный эффект. Повышение влажности до полной влагоемкости создает эффект взвешивания частиц. Прямые контакты частиц ЗШС уменьшаются, а действующее

поровое давление воды окончательно разуплотняет грунт.

В рамках стабилметрических испытаний определяли секущий модуль упругости, являющийся необходимым показателем для прогнозирования деформативности грунтов с использованием модели грунта Hardening Soil. Этот показатель представляет собой модуль деформации грунта при половине значения девиатора напряжений в момент разрушения [11]. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕКУЩЕГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ

Коэффициент уплотнения	0,9	0,95	1,0
Секущий модуль упругости, E50, МПа	11,26	13,23	13,89

Помимо секущего модуля, в приборе трехосного сжатия были определены значения модуля деформации при разной величине вертикальной нагрузки (рисунок 5).

В отличие от компрессионного модуля деформации (см. рисунок 3), в приборе трехосного сжатия с ростом нормального давления не происходит возрастания реактивного давления от боковых поверхностей, поэтому образец грунта имеет возможность расширяться. При росте нормального давления с боковым расширением образца скелет грунта переформируется. Увеличиваются местные сдвиги пока не достигается участок текучести грунта и следующее за ним разрушение образца.

Характер и внешний вид разрушения образцов также различается. При коэффициентах уплотнения ЗШС 0,9 и 0,95 деформация цилиндрического образца происходит с разру-

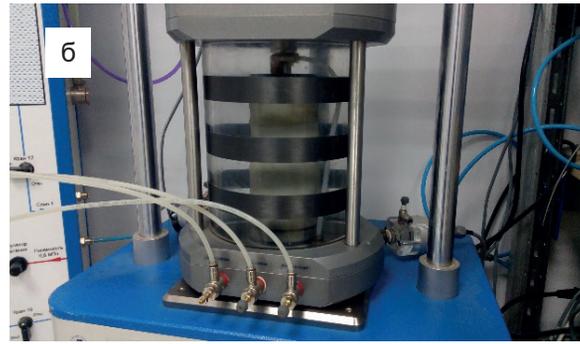
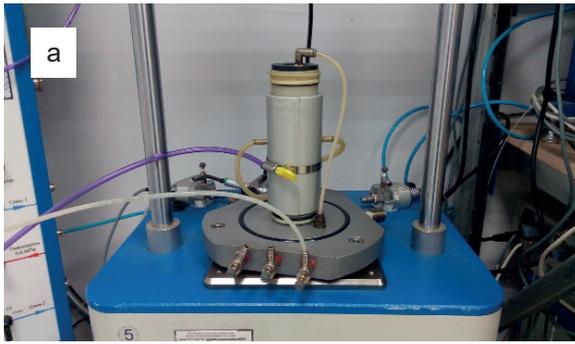


Рис. 2. Испытания ЗШС в приборе трехосного сжатия: а – образец обтягивается оболочкой; б – камера прибора с образцом

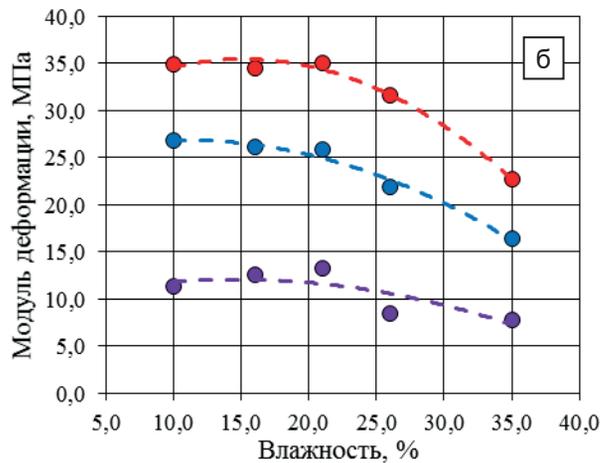
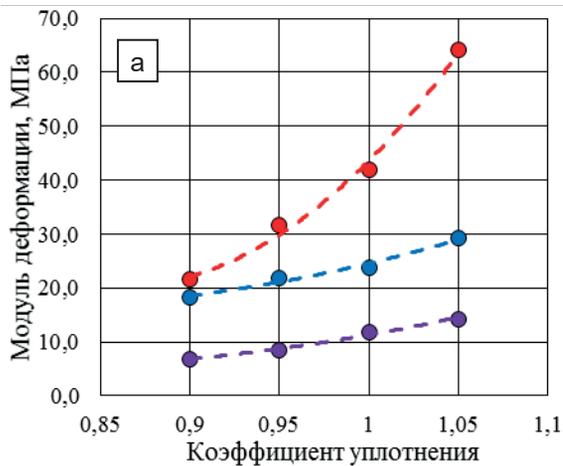


Рис.3. Зависимость модуля деформации ЗШС от коэффициента уплотнения (а) и влажности (б): ● – при вертикальном давлении 100 кПа; ● – 200 кПа; ● – 300 кПа.

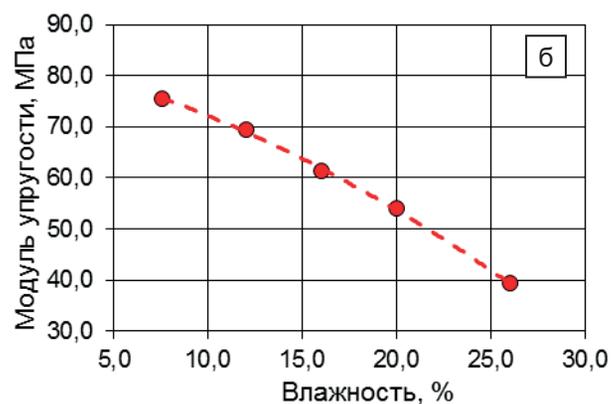
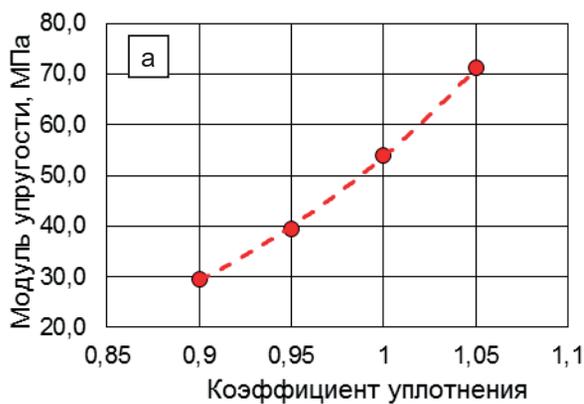


Рис.4. Зависимость модуля упругости ЗШС от коэффициента уплотнения (а) и влажности (б)

шением по виду «бочки», а более плотный образец (с коэффициентом уплотнения 1,0 и более) разрушается иначе – в виде диагональной плоскости сдвига. Это говорит о более прочной, но хрупкой его структуре, свойства которой определяются, по-видимому, более значительными механическими контактами частиц [12].

Несмотря на хрупкий характер разрушения, боковое расширение образца в процессе деформирования происходило более интенсивно, чем в менее плотных образцах. Вероятнее всего это связано с большими размерами пор в структуре менее уплотненной ЗШС, которые в первую очередь заполнялись мелкими частицами при местных сдвигах. Это, в свою

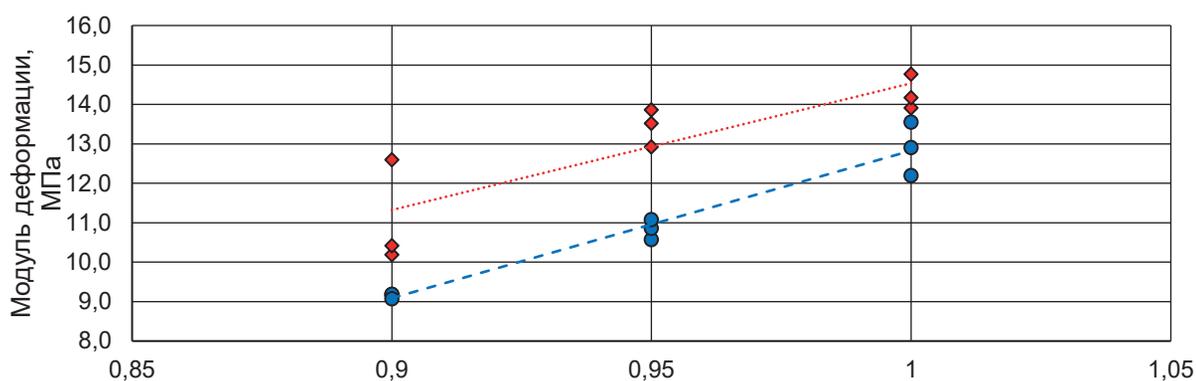


Рис. 5. Зависимости модуля деформации ЗШС от коэффициента уплотнения:
● – при вертикальном давлении 100 кПа; ◆ – при вертикальном давлении 200 кПа

очередь, препятствовало интенсивному боковому расширению.

Результаты определения коэффициентов Пуассона ЗШС при разной плотности образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ЗШС

Коэффициент уплотнения	0,9	0,95	1,00
Коэффициент Пуассона	0,094	0,133	0,167

В рамках исследования было проведено сравнение деформационных характеристик ЗШС с характеристиками природных грунтов [13 (табл. 3)].

ВЫВОДЫ

1. Исследуемая ЗШС относится к средне-деформируемым грунтам по классификации ГОСТ 25100 [14].

2. Деформативные параметры ЗШС зависят о плотности грунта, причем, увеличение плотности на 0,01 ед. коэффициента уплотнения дает прирост модуля упругости от 6,3 до 7,5 %, а модуля деформации от 2,3 до 4,6 %.

3. Влияние влажности на деформативные параметры ЗШС существенно, хотя и несколько ниже чем плотности. Причем, при оптимальной влажности значение модулей упругости и деформации имеет наименьшую величину.

4. В рамках испытаний на трехосное сжатие было отмечено изменение характера разрушения образца из ЗШС в зависимости от степени его уплотнения (переход от типа разрушения «бочка» к разрушению со сколом массива), что требует дополнительного изу-

чения особенностей структурного сцепления ЗШС с повышенной плотностью.

5. Значения коэффициента Пуассона ЗШС, полученные при стабилметрических испытаниях, оказались существенно ниже, чем значения, полученные на основе анализа экспериментов Биареза, Брукера, Михайловского, Яку, Мауне, Kulhawy [15]. Возможно, это связано с боковым обжатием образцов или их недостаточным уплотнением, что требует дополнительной серии испытаний без бокового давления.

6. Сравнение величины модулей деформации природных грунтов и ЗШС показывает, что этот показатель у техногенного грунта несколько ниже, чем у песчаных грунтов, но не уступает природным глинисто-пылеватым грунтам.

7. В первом приближении установлено, что ЗШС является грунтовым строительным материалом с деформативными показателями вполне пригодными для устройства оснований зданий и сооружений любого класса ответственности.

ПЛАНЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВКЛЮЧАЮТ В СЕБЯ:

- математическое моделирование устойчивости насыпей земляного полотна из ЗШС с использованием модели Mohr-Coulombi Hardening Soil;

- математическое моделирование несущей способности оснований из ЗШС для зданий и сооружений с использованием вышеуказанной модели;

- проведение дополнительных экспериментов для определения коэффициента Пуассона ЗШС в условиях отсутствия бокового давления;

- продолжение изучения прочностных и де-

РАСЧЁТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРИРОДНЫХ ГРУНТОВ

Геолого-генетический комплекс	Вид грунта	Показатель текучести	Значения модуля деформации грунтов (МПа) при коэффициенте пористости, равном					
			0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
Пылевато-глинистые нелёссовые грунты								
Аллювиальные, делювиальные	Супеси	$0 < I_L \leq 0,75$	32	24	16	10	7	-
	Суглинки	$0 < I_L \leq 0,25$	34	27	22	17	14	11
		$0,25 < I_L \leq 0,5$	34	25	19	14	11	8
		$0,5 < I_L \leq 0,75$	-	-	17	12	8	6
Озерные, озерно-аллювиальные	Глины	$0 < I_L \leq 0,25$	-	28	24	21	18	15
		$0,25 < I_L \leq 0,5$	-	-	21	18	15	12
		$0,5 < I_L \leq 0,75$	-	-	-	15	12	9
Флювиогляциальные	Супеси	$0 < I_L \leq 0,75$	33	24	17	11	7	-
	Суглинки	$0 < I_L \leq 0,25$	40	33	27	21	-	-
		$0,25 < I_L \leq 0,5$	35	28	22	17	14	-
		$0,5 < I_L \leq 0,75$	-	-	17	13	10	7
Моренные	Супесь Суглинок	$< I_L \leq 0,5$	55	45	-	-	-	-
Песчаные грунты								
Гравелистые и крупные		-	50	40	38	-	-	-
Средней крупности		-	50	40	30	-	-	-
Мелкие		-	48	38	28	18	-	-
Пылеватые		-	39	28	18	11	-	-

формационных показателей ЗШС с разным гранулометрическим составом;

- продолжение изучения особенностей структурообразования, прочностных и деформационных показателей насыпей из ЗШС в процессе их уплотнения, увлажнения – высушивания, замораживания – оттаивания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-48-550508 p_a).

Научные исследования по теме «Результаты исследований деформационных характеристик золошлаковых смесей» выполнены за счет средств бюджета Омской области

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1) Бирюков, В.В. Энергопроизводство и утилизация золошлаковых отходов / В.В. Бирюков, С.Е. Метелев, В.В. Сиротюк, В.Р. Шевцов // Вестник Российского государственного торгово-экономического университета. – М. – 2008. – №2(23) – С.221-229.

2. Лунёв, А.А. Экспериментальные исследования прочностных характеристик золошлаковой смеси / А.А. Лунёв, В.В. Сиротюк, Н.И. Барац // Вестник СибаДИ. –2016. – №6 (51).

3. Иванов, Е.В. Обоснование применения золошлаковых смесей для строительства земляного полотна с учетом водно-теплого-

го режима: дис. ... канд. техн. наук: 26.02.15: защищена 26.02.2015: утв. 01.07.2015 / Е.В. Иванов; науч. рук. проф. В.В. Сиротюк. – Омск, 2015. – 165 с.

4. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. – Введ. 2012-01-01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 88 с.

5. ГОСТ 22733-2002. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. – Введ. 2003-07-01. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. – 16 с.

6. ВСН 29-76. Технические указания по оценке и повышению технико-эксплуатационных качеств дорожных одежд и земляного полотна автомобильных дорог. – Введ. 1978-01-01. – М.: Транспорт, 1977. – 102 с.

7. Определение максимальной плотности грунтов, стандартным и модифицированным методами Проктора : методические указания / сост. : А.С. Александров, Т.В. Семенова, Г.В. Долгих. – Омск: СибАДИ, 2014. – 35 с.

8. ASTM D 1557 – 12. Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft – lbf / ft³ (2,700 KN – m / m³)). ASTM International, West Conshohocken, P.A., 2012. – 14 p.

9. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабо-

раторного определения физических характеристик.–Введ. 2016-04-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 20 с.

10. Цытович, Н.А. Механика грунтов (краткий курс) : учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1983. – 228 с.

11. Строкова, Л. А. Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // Известия ТПУ [Электронный ресурс]. – Электрон журн. – 2008. – Т. 313, – №1. – Режим доступа: <http://izvestiya.tpu.ru/ru/archive/old/article.html?id=188044&journalId=176237>

12) Болдырев, Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса / Г.Г. Болдырев. – Пенза : Изд-во ПГУАС, 2008. – 696 с.

13) СП 22.13330-2010. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – Введ. 2011-05-20. – М. : Минрегион России, 2011. – 166 с.

14) ГОСТ 25100-2011.Грунты. Классификация. – Введ. 2013-01-01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.

15) Александров, А.С. Совершенствование расчета дорожных конструкций по сопротивлению сдвигу. Ч 1. Состояние вопроса: Монография / А.С. Александров. – Омск : СибАДИ, 2015. – 292 с.

Experimental research of the deformation properties of ash and slag mixtures

Annotation. In the article discusses the results of laboratory tests coal ash and slag mixture from the ash pound of Omsk's TPP-4, working on the Ekibastuz coal. In the course of these studies identified the deformation properties of this man-induced soil depending on the degree of compaction and moisture content.

Suitability as a soil material for the construction embankments, subgrade of roads, and as the Foundation of buildings and structures was evaluated. The empirical dependence of the properties of ash and slag mixture from moisture and maximum dry density had been obtained in this research. Comparison of strength characteristics of ash and natural soil from our region also was carried out.

Keywords: ash and slag mixture, laboratory test, deformation properties, parameters for the mathematical modeling.

REFERENCES

1. Biryukov, V.V. the Generation and disposal of waste ash / V.V. Biryukov, S.E. Metelev V.V. Syrotiuk, V.R. Shevtsov // Bulletin of Russian state trade-economic University. The scientific journal. – М.– 2008. – №2(23) – Pp. 221-229.

2. Lunev A.A. Experimental study of strength characteristics of ash and slag mixture / A.A. Lunev, V.V. Sirotyuk, N. And. Baratz // Vestnik SibADI. 2016. – №6 (51). – Pp.72-79.

3. Ivanov, E.V. justification of the application of slag mixtures for construction of earthen-Lota with the water-thermal regime: the dissertation...

kand. tech. Sciences: 26.02.15 p: 26.02.2015 protected: approved. 01.07.2015 / E.V. Ivanov; scientific. hands. Professor V.V. Sirotyuk. – Омск, 2015. – 165 p.

4. GOST 12248-2010. Soils. Methods of laboratory determination of strength characteristics and de-formiruemoi. – J. 2012-01-01. – М.: STAN-DARTINFORM, 2011. – 88 p.

5. GOST 22733-2002. Soils. Laboratory method for determining maximum density. . 2003-07-01. – М.: Gosstroy of Russia, GUP tspp publ., 2003. 16 p.

6. BCH 29-76. Technical guidance on assessing and improving the technical and operating

