

ЧЕРЕПОВЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Инженерно-технический институт

---

Кафедра химических технологий

**СОЛЕВОЙ ИНДЕКС КОМПЛЕКСНЫХ  
МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ**

**Лабораторный практикум**

*Учебно-методическое пособие*

Череповец  
2021

Утверждено приказом ректора  
Череповецкого государственного  
университета № 01-02-762 от  
04.12.2020

Составители: *Д. В. Юновидов*, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации и управления (Череповецкий государственный университет); *В. В. Соколов*, канд. техн. наук, доцент кафедры химических технологий (Череповецкий государственный университет); *К. В. Аксенчик*, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой химических технологий (Череповецкий государственный университет); *М. Н. Надежин*, аспирант (Череповецкий государственный университет)

Рецензенты: *А. В. Артамонов* – канд. техн. наук, доцент кафедры химических технологий (Череповецкий государственный университет); *В. А. Шабалов* – канд. техн. наук, доцент (Череповецкий государственный университет)

Научный редактор: *О. А. Калько* – канд. техн. наук, доцент (Череповецкий государственный университет)

© Авторы, 2021  
© Череповецкий государственный  
университет, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Лабораторная работа 1. Теоретическое определение солевого индекса минеральных удобрений.....	9
Лабораторная работа 2. Определение солевого индекса как отношения осмотических давлений.....	18
Лабораторная работа 3. Определение солевого индекса по удельной электропроводимости разбавленных растворов минеральных удобрений.....	22
Список литературы .....	30

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день понятия «сельское хозяйство» и «минеральные удобрения» взаимосвязаны. Различные виды удобрений используются повсеместно для выращивания всевозможных посевных культур. Имеются отличия и в способах внесения удобрений в почву. Например, удобрения могут использоваться в твердом виде; иногда требуется приготовление раствора для добавления в почву или для внекорневого применения; кроме того, удобрения можно вносить локально – рядом с зерном или корнем – и это далеко не полный список. Однако при любом способе использования удобрений, а особенно при добавлении их непосредственно рядом с корнями или семенами, возникает опасность повредить посевы. Вред может быть нанесен за счет так называемого солевого эффекта (в зарубежной литературе – “salt effect”). Данное явление приводит к «выгоранию» семян, корней или всходов (см. рис. 1).



Рис. 1. Пример «выгорания» посевов

Причина солевого эффекта кроется в насыщении почвенного раствора минеральными солями. Разница концентраций, вызванная высоким содержанием солей, создает сильное осмотическое давление внутри клеток корня или семени, что в свою очередь может привести к удалению воды из растения и десикации (иссушению)

его клеток. Степень десикации растений зависит от многих факторов, таких как:

- вид вносимого удобрения;
- доза удобрения;
- количество влаги и минеральных солей в почве;
- расстояния между семенами (всходами) и местом внесения удобрения.

Чтобы оценить перечисленные факторы, а также иметь количественный критерий оценки вредного действия того или иного удобрения, в 1943 г. Л. Райдер совместно с другими учеными ввел понятие «солевой индекс» (СИ), определив его как индекс соли удобрения, который представляет собой меру концентрации в почвенном растворе<sup>1</sup>. Было отмечено, что приемлемым для растений является осмотическое давление в диапазоне от 0,4 до 4,4 атм (от 40,5 до 445,8 кПа). В годы публикации указанной статьи понятие СИ применялось как нормированная мера возникающего осмотического давления в почвенном растворе между удобрением (солью) и растением. За стандарт, 100 условных единиц, был выбран нитрат натрия ( $\text{NaNO}_3$ ); это обусловлено тем, что он имеет высокую растворимость в воде, применялся как удобрение в 50-х гг. прошлого столетия и обладает неизменным осмотическим давлением в почвенном растворе и в чистой воде. Следовательно, величина СИ является коэффициентом разницы осмотического давления раствора удобрения и раствора нитрата натрия той же концентрации.

Следует отметить, что СИ не предсказывает точное количество удобрений или состав сложных удобрений, которые могут повредить растениям. Однако он представляет собой меру сравнения удобрений по их осмотическому (солевому) эффекту (см. рис. 2).

---

<sup>1</sup> Rader Jr. L. F., White L. M., Whittaker C. W. The salt index – A measure of the effect of fertilizers on the concentration of the soil solution // Soil science. – 1943. – Vol. 55. – № 3. – P. 201–218.

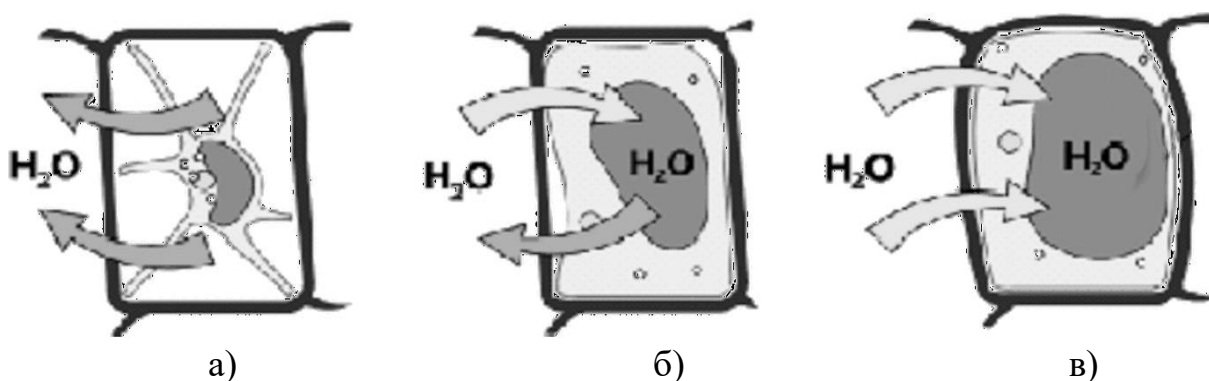


Рис. 2. Содержание и движение воды в клетках корневой системы за счет осмотического давления<sup>1</sup>:

- а) высокий СИ – вода вытягивается из клеток корней;
- б) сбалансированный СИ – оптимальный водный баланс;
- в) низкий СИ – дополнительный приток воды в клетки корневой системы

В общем случае величина СИ прямо пропорциональна потенциальной опасности для растения (чем больше СИ, тем более вредным может оказаться удобрение). Рассматриваемый критерий позволяет количественно оценить возможную опасность того или иного удобрения и на сегодняшний день является единственным количественным критерием подобного рода.

Наряду с СИ необходимо учитывать следующие факторы, влияющие на качество посевов:

- объем поливочной воды, недостаток влаги в почве;
- температура окружающей среды;
- относительная влажность воздуха;
- тип почвы.

Помимо всего прочего, повреждение посевных культур может быть вызвано отдельными эффектами некоторых удобрений, таких как мочевины, фосфат аммония или тиосульфат аммония. Данные типы удобрений при определенных почвенных условиях выделяют свободный аммиак (NH<sub>3</sub>). Указанное вещество может обладать фитотоксичным эффектом, вызывающим слабое прорастание рассады или ее гибель.

В литературе находит отражение тот факт, что фосфат-ионы

<sup>1</sup> Understanding Salt Index. – URL: [https://www.precisionlab.com/resources/wuxal\\_understanding\\_salt\\_index.pdf](https://www.precisionlab.com/resources/wuxal_understanding_salt_index.pdf) (дата обращения: 11.05.2021).

оказывают меньшее негативное влияние на растение, чем ионы калия или азота. Нитрат-ионы более подвижны и быстрее проникают в корни растений за счет общей диффузии в почвенном растворе. При этом отдельными авторами доказано, что СИ, при котором происходит уменьшение всходов, на 50 % зависит от объема полива и типа культур, и может меняться в широких пределах. Восприимчивость посевных культур к солевому составу почвы (с точки зрения осмотического давления) возрастает в следующей цепочке: пшеница – кукуруза – кормовые бобовые – соя и съедобная фасоль – овощи (включая сладкую кукурузу).

В России большое внимание агрохимии уделялось такими выдающимися учеными, как К. А. Тимирязев, Д. Н. Прянишников, П. А. Костычев, А. Е. Зайкевич; благодаря трудам данных исследователей была реализована процедура внесения удобрений на некотором расстоянии от семени (корня). Кроме того, в связи с климатическими особенностями (влажный климат на большей части территории) учет величины СИ в России не проводился.

На сегодняшний день сам критерий СИ признан агрохимиками устаревшим и имеет ряд недостатков:

- не включает в себя оценку воздействия на посевы количества вносимых удобрений;
- не оценивает влияние типа почв и типа посевных культур;
- зависит от агрегатного состояния удобрений и степени разбавления водой;
- имеет место путаница в определении СИ через осмотическое давление и / или электропроводность растворов удобрений.

Из всего вышеперечисленного можно сделать вывод, что существующую концепцию СИ необходимо доработать. Сам СИ следует учитывать:

- для регионов с засушливым климатом;
- при условиях внесения удобрений в непосредственной близости от растения (например, при внекорневой подкормке, когда распыление раствора происходит именно на посадки и часть испаряется);

– для растений с семенами малой массы (свекла, лен и т. п.), которым может нанести вред удобрение с высоким СИ.

В данном учебно-методическом пособии представлены методики, включающие теоретический и экспериментальный методы расчета солевого индекса с целью изучения указанного понятия и возможных путей его модернизации. Акцент сделан на сравнении различных способов вычисления СИ, а на исследовании разных марок удобрений и их влияния на растения. В конце пособия приведен расширенный список литературы по теме для самостоятельного изучения.

Следует учитывать, что табличные значения СИ могут существенно отличаться в зависимости от источника. Это обусловлено неопределенностью понятия солевого индекса и отсутствием единой методики его измерений. Так, одни исследователи проводят нормировку только на основное питательное вещество, другие – на сумму питательных веществ. Сами значения солевого индекса могут быть получены по методике оценки осмотического давления (лабораторная работа 2) или по методике оценки проводимости растворов удобрений (лабораторная работа 3).

Важно понимать следующее:

1) осмотическое давление в чистой воде и в почвенном растворе может существенно отличаться (это вызвано определенными эффектами фиксации питательных веществ, особенно фосфора, в почве);

2) СИ не всегда является аддитивной величиной и линейно зависит от концентрации; он представляет собой характеристику почвы, для которой исследуется.

Тем не менее на сегодняшний день широко используется подход теоретического определения СИ. В настоящем пособии Вам будет предложено сравнить различные подходы друг с другом и выбрать тот, который, с Вашей точки зрения, является наиболее обоснованным.

Учебно-методическое пособие предназначено для обучающихся по направлению подготовки 18.03.01 «Химическая технология»



уровня бакалавриата, осваивающих дисциплину «Технология комплексных минеральных удобрений».

### *Лабораторная работа 1*

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОЛЕВОГО ИНДЕКСА МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ**

*Цель работы:* ознакомиться с теоретическим методом определения солевого индекса минеральных удобрений и рассчитать с помощью него солевой индекс NPK удобрений.

### **Основные теоретические сведения**

Традиционным методом расчета СИ для различных марок удобрений является теоретический способ, подробно изложенный в ряде научных работ. Некоторые авторы отмечают, что лучше использовать относительный СИ, который заключается в нормировке абсолютного значения СИ на единицу массы питательных веществ.

Солевые индексы наиболее распространенных удобрений представлены в табл. 1.

*Таблица 1*

#### **Солевые индексы наиболее распространенных удобрений**

<b>Вещество</b>	<b>Содержание питательных веществ</b>	<b>Увеличение осмотического давления</b>	<b>Солевой индекс</b>	<b>Относительный солевой индекс<sup>1</sup></b>
1	2	3	4	5
<b>N основа</b>				
Аммиак, NH <sub>3</sub> , 82,2 % N (хч)	82,2	0,2776	47,1	0,573
NH <sub>4</sub> HCO <sub>3</sub> , 17,7 % N (хч)	17,7	0,0370	6,3	0,356

<sup>1</sup> Нормирован на сумму основных питательных веществ

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
Нитрат аммония, $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 35 % N (хч)	35,0	0,6180	100	2,857
Нитрат кальция, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	11,9	0,3095	52,5	
Cal-Nitro	20,5	0,3605	61,1	
Цианамид	21,0	0,1830	31,0	
Мочевина, $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , 46,6 % N (хч)	46,6	0,4450	75,4	
КАС, 28 % N (39 % $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 31 % $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ )	28	–		2,250
КАС, 32 % N (44 % $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 35 % $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ , 21 % $\text{H}_2\text{O}$ )	32	–		2,222
Сульфат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , 21,2 % N, 24,3 % S (хч)	21,1	0,4070	69,0	
Органический азот	3,0	0,0207	3,5	
Органический азот	5,0	0,0207	3,5	
Органический азот	7,0	0,0207	3,5	
Органический азот	9,0	0,0207	3,5	
Органический азот	11,0	0,0207	3,5	
Органический азот	13,0	0,0207	3,5	

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
<b>Р-основа</b>				
CaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O (хч)	56,3	0,0911	15,4	
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O (хч)	51,4	0,2133	36,2	
Гидроорто- фосфат маг- ния, MgHPO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O (хч, di- magnesium phosphate)	40,7	0,0254	4,3	
Суперфосфат	16,0	0,0460	7,8	
Суперфосфат	18,0	0,0460	7,8	
Суперфосфат	20,0	0,0460	7,8	
Суперфосфат	45,0	0,0595	10,1	
Суперфосфат	48,0	0,0595	10,1	
Фосфорная кислота, 54 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	54,0	–	54	1,613
Фосфорная кислота, 72 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	72,0	–	72	1,754
<b>К-основа</b>				
Каинит	12,5	0,6250	105,9	
Каинит	17,5	0,6455	109,4	
KCl	50,0	0,6457	109,4	
KCl	60,0	0,6860	116,3	
KCl (хч)	63,2	0,6745	114,3	
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (хч)	54,0	0,2720	46,1	
Калий- магниевый сульфат	21,9	0,2548	43,2	
Тиосульфат калия, K <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 49,5 % K <sub>2</sub> O, 33,7 % S	49,5	–		2,747

1	2	3	4	5
<b>НК-основа</b>				
Дигидрофосфат калия, 52,2 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 35,8 % K <sub>2</sub> O (хч)	87	0,0495	8,4	0,097
Гидрофосфат калия, K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> , 40,8 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 54 % K <sub>2</sub> O	94,8	–		0,184
<b>Прочие</b>				
Карбонат кальция (хч)	56,0	0,0275	4,7	
Доломит	20,0	0,0049	0,8	
Гипс (хч)	32,6	0,0475	8,1	
MgO (хч)	100,0	0,0100	1,7	
NaCl (хч)	53,0	0,9075	153,8	
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (хч)	43,6	0,4375	74,2	

Во избежание путаницы и для упрощения понятия СИ в таблице представлены только относительные значения солевых индексов на единицу всех питательных веществ. Там, где приведены значения разности осмотического давления, данные взяты из оригинальной статьи Л. Райдера<sup>1</sup>. Отметим еще раз: теоретический расчет солевого индекса является устаревшим понятием, для которого существует определенная путаница в толкованиях.

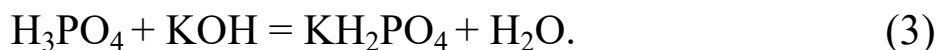
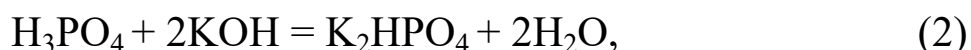
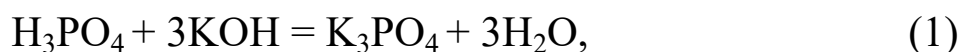
Принято считать, что СИ сложной смеси удобрений (например, НРК) – аддитивная величина входящих в состав удобрения более простых компонентов (с известными СИ). При этом приведенные в табл. 1 данные СИ отдельных компонентов умножаются на их соответствующие массовые доли для удобрения и для смеси, а затем суммируются, давая искомое значение СИ. Принято считать, что растениями хорошо переносятся смеси удобрений с СИ менее

<sup>1</sup> Rader Jr. L. F., White L. M., Whittaker C. W. The salt index – A measure of the effect of fertilizers on the concentration of the soil solution // Soil science. – 1943. – Vol. 55. – № 3. – P. 201–218.

20. Однако это очень зависит от типа почвы и типа растения.

Данный подход удобен тем, что позволяет быстро оценить возможную опасность той или иной марки удобрений для посевов. К сожалению, описанный способ неприменим, когда значение СИ одного из составляющих неизвестно.

При отсутствии табличных значений можно использовать аддитивность СИ для его расчета по химическим реакциям. Рассмотрим расчет СИ на примере получения фосфатов калия из фосфорной кислоты с гидроксидом калия:



Значение СИ для гидроксида калия отсутствует. Соотношения между KOH и H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (между K<sub>2</sub>O и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> соответственно) преобразуются как соотношения между их продуктами KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> и K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (см. табл. 2), для которых теоретически рассчитываются значения СИ.

Таблица 2

Значения солевых индексов твердых смесей (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>+K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)

Массовое соотношение w(K <sub>2</sub> O)/ w(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Массовая часть компонентов, %		Питательные вещества, %		Общие питательные вещества, % w(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O)	Солевой индекс
	w(KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	w(K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> )	w(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	w(K <sub>2</sub> O)		
1	2	3	4	5	6	7
0,663	100	–	52,15	34,61	86,76	8,4
0,7	93,12	6,88	51,36	35,94	87,30	9,0
0,8	75,13	24,87	49,30	39,18	88,48	10,6
0,9	58,56	41,44	47,42	42,67	90,09	12,1
1,0	43,18	56,82	45,66	45,66	91,32	13,5
1,1	28,93	71,07	44,04	48,44	92,48	14,8

1	2	3	4	5	6	7
1,2	15,63	84,37	42,53	51,04	93,57	16,0
1,3	3,24	96,76	41,11	53,44	94,55	17,1
1,327	–	100	40,75	54,08	94,83	17,4

При этом СИ вычисляется как аддитивная величина по уравнениям:

$$СИ_{PK} = СИ_{KН_2PO_4} \cdot w_{KН_2PO_4} + СИ_{K_2HPO_4} \cdot w_{K_2HPO_4}, \quad (4)$$

$$СИ_{PK} = 8,4 \cdot w_{KН_2PO_4} + 17,4 \cdot w_{K_2HPO_4}, \quad (5)$$

где  $СИ_{PK}$  – СИ смеси ( $KН_2PO_4$  и  $K_2HPO_4$ );  $w_i$  – массовые доли  $KН_2PO_4$  и  $K_2HPO_4$ , доли ед.

Для двухкомпонентной смеси можно построить график зависимости отношения питательных компонентов от СИ и использовать его для быстрого определения СИ смеси (см. рис. 3 и рис. 4).

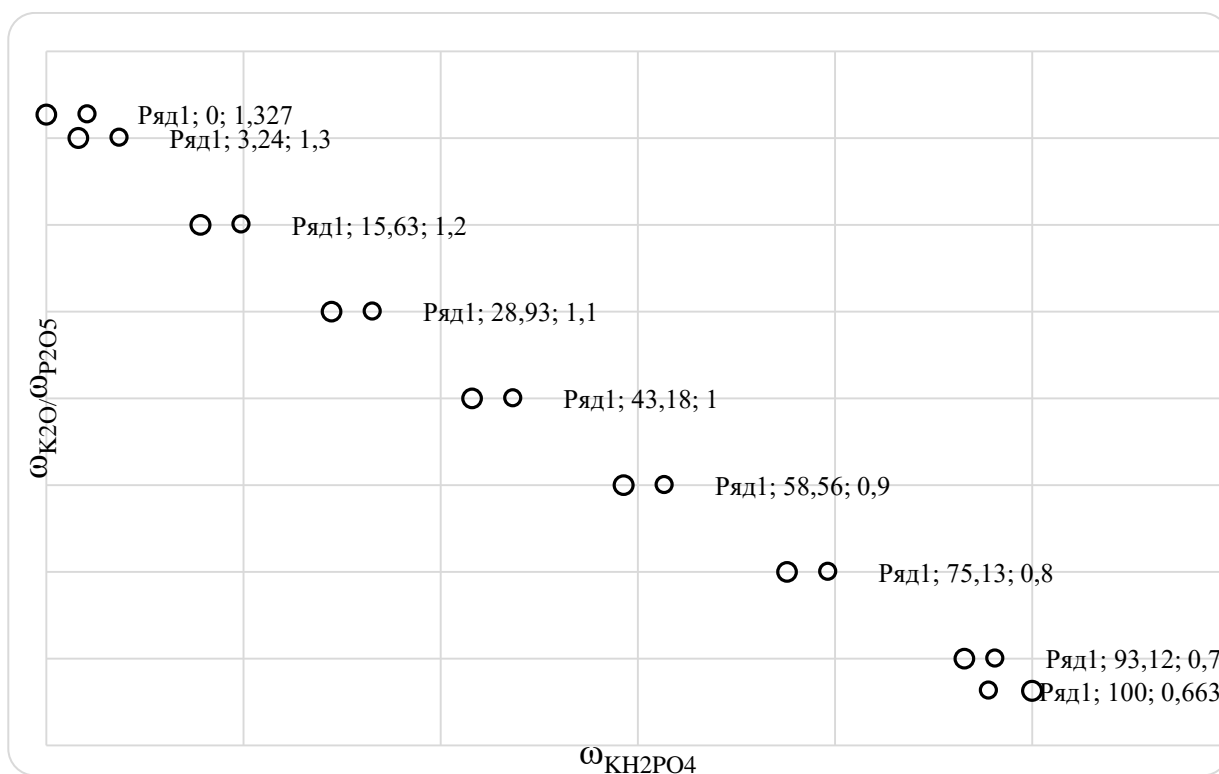


Рис. 3. Зависимость отношения питательных веществ от содержания  $KН_2PO_4$

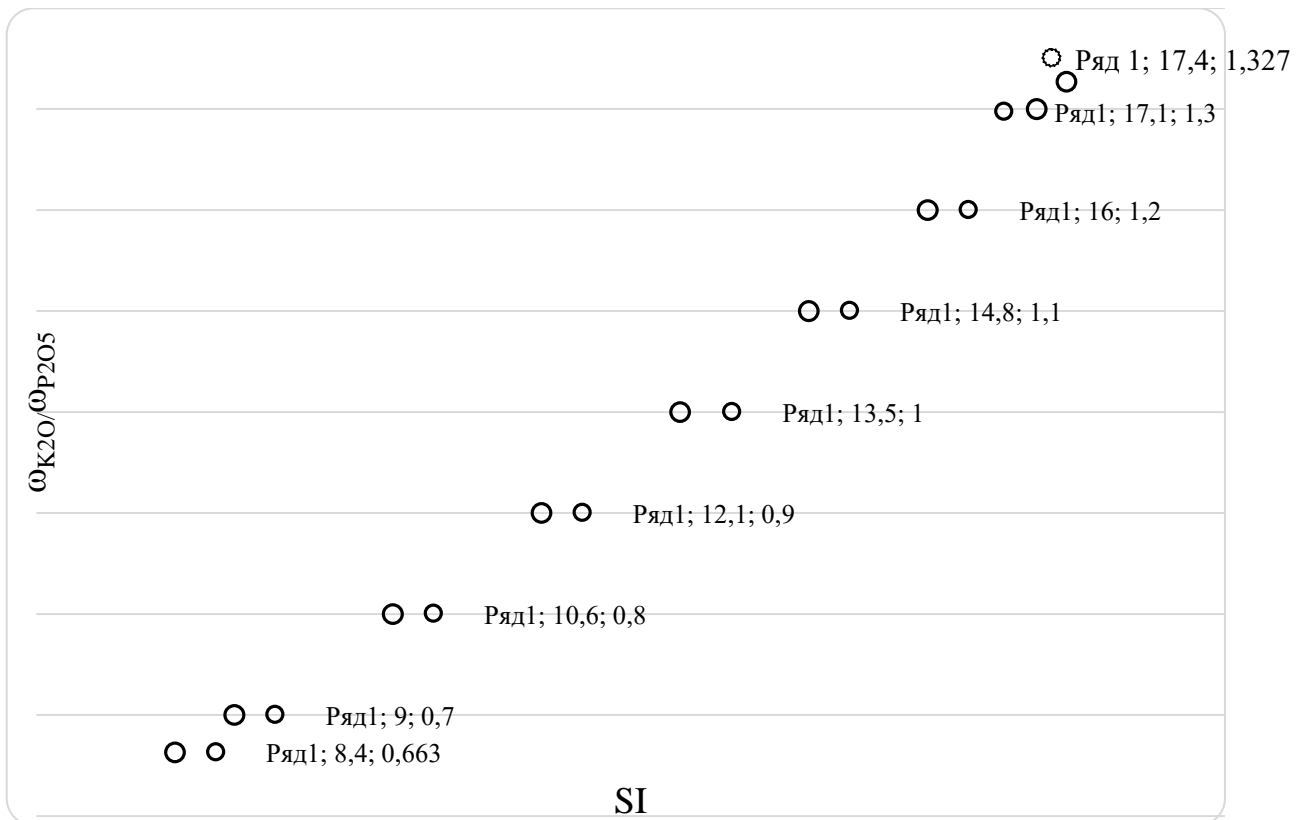


Рис. 4. Зависимость отношения питательных веществ от СИ

Процедура теоретического расчета солевого индекса включает в себя работу с табл. 1 и табл. 2 (при необходимости).

Последовательность расчета СИ:

- составить список исходных компонентов в соответствии с маркой удобрения (см. столбец 1 в табл. 3);
- заполнить массовую долю каждого из исходных компонентов для марки удобрения (см. столбец 2 в табл. 3);
- внести единицы питательных веществ (см. столбцы 3–6 в табл. 3) в соответствии с маркой удобрения и исходными компонентами (необходимо учитывать содержание питательных веществ, массу компонента и марку удобрения);
- составить список относительных СИ на единицу питательных элементов (см. столбец 7 в табл. 3);
- определить СИ каждого исходного компонента посредством умножения суммы единиц питательных веществ на соответствующие относительные СИ с учетом массовой доли компонента (см. столбец 8 в табл. 3);
- рассчитать общий СИ сложением СИ каждого из компонентов.

## Форма таблицы для теоретического расчета солевого индекса

Исходные компоненты	Массовая доля компонентов	Содержание питательных веществ в пересчете на N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> и K <sub>2</sub> O	Питательные вещества, %			СИ	
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Относительный	Общий
1	2	3	4	5	6	7	8

Методика классического теоретического расчета СИ рассмотрена ниже на примере жидкого NPK удобрения состава 6-24-6, полученного из H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, K<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> и NH<sub>3</sub> (см. табл. 4).

## Пример расчета NPK удобрения

Исходные компоненты	Массовая доля компонентов	Содержание питательных веществ в пересчете на N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> и K <sub>2</sub> O	Питательные вещества, %			СИ	
			N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Относительный	Общий
1	2	3	4	5	6	7	8
NH <sub>3</sub>	0,073	82 % N	82	–	–	0,572	3,4
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0,333	54 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–	54	–	1,613	29,0
K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0,273	22 % K <sub>2</sub> O 22 % P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–	22	22	0,097	1,2
Вода	0,321	–	–	–	–	–	–
Общее значение	1	–	82	76	22	–	<b>33,6</b>

Теоретические способы расчета СИ позволяют быстро узнать значение практически любой марки удобрений и оценить степень ее влияния на посевы. Однако описанный подход неприменим, когда требуется изучить неизвестную марку удобрений или определить влияние внешних факторов на реальный показатель СИ. Кро-



ме того, рассмотренный способ не учитывает технологические особенности производства удобрений на различных предприятиях. Установлено, что данный подход неприменим для некоторых марок удобрений, изготавливаемых на АО «Апатит» (NPK(S), NP+S, NPS+S), в связи с отсутствием учета особенностей их фазового и химического составов.

### **Порядок выполнения работы**

1. Получить у преподавателя задание на определение солевого индекса NPK удобрения по теоретическому методу.
2. Вычислить солевой индекс по методике классического теоретического расчета.
3. Расчетные данные свести в таблицу, аналогичную табл. 3.
4. Оформить отчет и сдать его на проверку преподавателю.

### **Структура и содержание отчета**

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Таблица расчетных данных. Расчеты с пояснениями.
5. Обсуждение результатов.
6. Выводы.
7. Список литературы.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение понятию «солевой индекс».
2. В каких случаях нужно учитывать СИ?
3. Что называется относительным СИ?
4. Как проводится пересчет относительного СИ в общее значение?
5. Как рассчитывается СИ сложной смеси удобрений?

6. Объясните методику классического теоретического расчета СИ.

7. Назовите достоинства и недостатки теоретического способа расчета СИ.

8. Сравните СИ для KCl в табл. 1. Почему для химически чистого KCl солевой индекс не самый высокий?

### *Лабораторная работа 2*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОЛЕВОГО ИНДЕКСА КАК ОТНОШЕНИЯ ОСМОТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ**

*Цель работы:* ознакомиться с теоретическим методом расчета солевого индекса как соотношения осмотического давления разбавленных растворов  $\text{NaNO}_3$  и удобрения.

### **Основные теоретические сведения**

Изначально СИ рассчитывался как осмотическое давление почвенного раствора минерального удобрения на клетки растения. В 1943 г. был описан экспериментальный способ расчета осмотического давления почвенного раствора с удобрением по температуре замерзания раствора для определения СИ. Данный метод заключался в проведении следующих операций:

1. Навеску высушенной до постоянной массы и просеянной через сито 2 мм почвы помещали в герметичный мешок.

2. К почве добавляли навеску удобрения до соотношения с почвой 100 фунтов на акр ( $453,5 \text{ кг на } 4046,9 \text{ м}^2$ , или  $0,11 \text{ кг/м}^2$ ) и хорошо перемешивали. Для расчета массы удобрения использовалось предположение, что 6 инч высушенного почвенного слоя с 1 акра весят около 2 млн фунтов или 900000 кг. Тогда массовая доля удобрения составит  $453,5 / 900\ 000 = 0,05 \%$ .

3. Почву в мешке увлажняли дистиллированной водой до достижения 75 % от эквивалентной влажности (величина, характерная для того или иного вида почвы).

4. Затем мешок с увлажненной смесью закрывали, перемешивали и хранили при 5 °С в течении 5 дней (для предотвращения биологических процессов в почве).

5. Почву с удобрением из пакета отжимали (вытеснением или на центрифуге).

6. Определяли температуру замерзания полученного почвенного раствора.

7. По установленной температуре замерзания рассчитывали осмотическое давление с использованием второго закона Рауля:

$$C = \frac{\Delta t}{K_{кр}}, \quad (6)$$

где  $\Delta t$  – понижение температуры замерзания раствора по сравнению с чистым растворителем;  $K_{кр}$  – криоскопическая константа растворителя, равная  $K_{кр} = \Delta t$ , при  $C_M = 1$  моль/кг растворителя.

Тогда осмотическое давление для разбавленных растворов с учетом (6) можно вычислить по формуле:

$$P_0 = C_M RT \approx CRT = \frac{\Delta t}{K_{кр}} RT, \quad (7)$$

где  $C_M$  – молярная концентрация в 1 л раствора,  $R = 8,314$  Дж/(моль К),  $T$  – температура окружающей среды, К.

В работе, посвященной солевому индексу, Л. Райдер и другие авторы использовали эмпирическое уравнение<sup>1</sup>:

$$P = 12,06\Delta - 0,021\Delta^2, \quad (8)$$

---

<sup>1</sup> Rader Jr. L. F., White L. M., Whittaker C. W. The salt index – A measure of the effect of fertilizers on the concentration of the soil solution // Soil science. – 1943. – Vol. 55. – № 3. – P. 201–218.

где  $P$  – осмотическое давление;  $\Delta$  – разница в температуре замерзания.

8. Полученные значения осмотического давления сравнивали со значением для  $\text{NaNO}_3$  и рассчитывали солевой индекс по формуле:

$$\text{СИ} = \frac{P_{0 \text{ удобрения}}}{P_{0 \text{ NaNO}_3}} \cdot 100. \quad (9)$$

Однако описанный подход обладает рядом недостатков:

- 1) длительность проведения эксперимента;
- 2) зависимость от типа почвы и окружающей температуры;
- 3) необходимость в предварительном установлении значения криоскопической константы для каждого исследуемого удобрения.

При этом в оригинальной работе 1943 г.<sup>1</sup> исследовался ограниченный набор удобрений, часть из которых на сегодняшний день уже не применяется.

Данный метод впоследствии был модернизирован М. Л. Джексоном для измерения СИ по проводимости растворов. Отчасти именно по этой причине существует определенное расхождение в толковании данного явления.

Для упрощения экспериментальной работы предлагается провести теоретический расчет осмотического давления для ряда удобрений и сравнить полученную величину со значениями, представленными в табл. 1.

Для расчета предположим, что каждое удобрение в разбавленном растворе полностью диссоциирует на ионы. Тогда молярную концентрацию в растворе можно рассчитать по количеству молей вещества, а осмотическое давление будет выражено следующим образом:

$$P_0 = C_M RT = 293,15 \cdot 8,314 \cdot C_M = 2437,25 \cdot C_M.$$

---

<sup>1</sup> Rader Jr. L. F., White L. M., Whittaker C. W. The salt index – A measure of the effect of fertilizers on the concentration of the soil solution // Soil science. – 1943. – Vol. 55. – № 3. – P. 201–218.

*Пример.* Рассчитаем осмотическое давление 0,1 % водного раствора удобрения  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  при нормальных условиях ( $T = 293,15 \text{ K}$ ).

*Решение.* Для приготовления 0,1 % водного раствора нам требуется 1 г удобрения на 1000 г дистиллированной воды (или эквивалентное отношение). Если диссоциация прошла полностью (раствор сильно разбавлен), то:



$$C_M = \frac{N_{\text{моль в-ва}}}{V_{\text{раствора}}} = \frac{2 \cdot n_{\text{моль } \text{NH}_4\text{NO}_3}}{\frac{m}{\rho}} = \frac{2 \cdot \frac{1 \text{ г}}{M}}{\frac{1 \text{ г}}{\text{мл}}} =$$

$$= \frac{0,002}{(14 \cdot 2 + 1 \cdot 4 + 16 \cdot 3)} = 0,025 \frac{\text{моль}}{\text{л}} ,$$

$$P_0 = 2437,25 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}} \cdot 0,025 \frac{\text{моль}}{\text{л}} = 30,5 \frac{\text{Дж}}{\text{л}} = 30,5 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{дм}^3} =$$

$$= 30,5 \cdot 1000 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 30500 \text{ Па} = 0,3 \text{ атм} .$$

Аналогично рассчитывается осмотическое давление для 0,1 % раствора  $\text{NaNO}_3$ . Солевой индекс определяется по формуле (9).

### Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание на определение осмотического давления удобрения по теоретическому методу.
2. Описать процесс диссоциации удобрения в водном растворе и выполнить расчет осмотического давления и рассчитать СИ.
3. Провести сравнение полученных данных с теоретическими значениями СИ из табл. 1.
4. Оформить отчет и сдать его на проверку преподавателю.

## Структура и содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Уравнение химических реакций. Расчеты с пояснениями.
5. Сравнение с табличными данными (табл. 1)
6. Обсуждение результатов.
7. Выводы.
8. Список литературы.

## Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятию «солевой индекс» с точки зрения осмотического давления.
2. Как рассчитать теоретическое осмотическое давление разбавленного раствора?
3. Опишите экспериментальную методику расчета осмотического давления.
4. Почему нельзя использовать просто теоретический расчет вместо экспериментального, каких данных не хватает для реальной системы?
5. Назовите достоинства и недостатки расчета СИ по осмотическому давлению.

## *Лабораторная работа 3*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОЛЕВОГО ИНДЕКСА ПО УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТИ РАЗБАВЛЕННЫХ РАСТВОРОВ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ**

*Цель работы:* ознакомиться с экспериментальным методом определения солевого индекса минеральных удобрений путем измерения удельной электропроводимости их разбавленных

растворов и вычислить, используя данный метод, солевой индекс рабочих проб минеральных удобрений.

### Основные теоретические сведения

Впервые экспериментальный метод нахождения СИ через проводимость растворов был предложен М. Л. Джексоном. Суть его состоит в измерении удельной электропроводимости 0,1 % раствора удобрения с последующим расчетом СИ по формуле:

$$SI = \frac{\kappa_1}{\kappa_2} \cdot 100 \% , \quad (10)$$

где  $SI$  – значение СИ конкретного удобрения;  $\kappa_1$ ,  $\kappa_2$  – удельная электропроводимость 0,1 % раствора удобрения и 0,1 % раствора нитрата натрия соответственно, мкСм/см. Раствор удобрения готовился в течение 24 ч; при этом некоторые авторы измеряют проводимость после 48 ч. На наш взгляд, необходимо определять проводимость после достижения ею стабильного значения или с опорой на данные по растворимости минеральных удобрений. Для всех удобрений в настоящей работе достаточно 30 мин, однако растворение должно быть более интенсивным (используем перемешивание, измельчение гранул удобрений и нагретый раствор).

Преимущества данного способа:

- экспрессность;
- возможность аттестации методики и получения конкретных значений СИ для любого удобрения;
- простота пробоподготовки.

Недостатком указанного метода является сильная чувствительность к внешним условиям (температура раствора) и неявная связь с осмотическим давлением на клетки растения. Например, проницаемость мембраны клетки зависит не столько от заряда иона, сколько от его размера и типа. Кроме того, некоторые растворенные вещества не влияют на проводимость, но оказывают воздействие на осмотическое давление (например, глюкоза).

В ряде работ наряду с проводимостью рассчитывают общее содержание растворенных веществ (TDS – Total Dissolved Solids). TDS вычисляется путем выпаривания раствора и взвешивания сухого остатка в ppm (миллионная доля) или мг/л. Часто TDS связывается с проводимостью через определенный фактор пересчета (константу, зависящую от свойств растворенного вещества).

Основной задачей настоящей работы является вычисление проводимости, TDS и солевого индекса ряда минеральных удобрений и сравнение полученных значений с теоретическим расчетом СИ по таблицам и с теоретическим расчетом СИ по осмотическому давлению. Кроме того, необходимо определить фактор пересчета TDS в электропроводность (или обосновать невозможность такого пересчета).

### **Порядок выполнения работы и обработка экспериментальных данных**

**Средства измерений, вспомогательное оборудование, материалы, химическая посуда и реактивы:**

- кондуктометр с диапазоном измерения от 0 до 20000 мкСм/см («Марк-603/1» ДП-3 по ТУ 4215-026-39232169, погрешность измерения  $\pm(0,05+0,025 \cdot x)$ );
- весы электронные специальные I класса точности ( $m_{max} = 120$  г,  $e = 0,0001$  г) по ГОСТ OIML R 76-1;
- весы электронные высокого (II) класса точности ( $m_{max} = 2100$  г,  $e = 0,01$  г) по ГОСТ OIML R 76-1;
- размольное устройство с тониной помола не более 500 мкм;
- перемешивающее устройство по ТУ-4389-007-44330709;
- делитель проб Джонса по ГОСТ 5445;
- пипет-дозатор объемом 1–10 см<sup>3</sup> по ГОСТ 28311;
- стакан В-1-400 ТХС по ГОСТ 25336;
- воронка В-56-80 ХС по ГОСТ 25336;
- фильтры обеззоленные «белая лента» по действующей нормативной документации;
- натрий азотнокислый по ГОСТ 4168, хч;



- вода дистиллированная по ГОСТ 6709;
- рабочие пробы комплексных фосфорсодержащих минеральных удобрений, перечень которых приведен в табл. 9.

Допускается использование других средств измерений, вспомогательного оборудования с метрологическими и техническими характеристиками, не уступающими указанным выше. Разрешается применение реактивов аналогичной или более высокой квалификации, изготовленных по другой нормативной документации (в том числе импортных).

## **Ход работы**

### **Подготовка и определение электропроводимости раствора**

Перед началом эксперимента готовят необходимое количество дистиллированной воды (около 5 л), после чего проверяют для нее значение проводимости и TDS согласно процедурам, описанным ниже.

Для приготовления раствора удобрения или  $\text{NaNO}_3$  с концентрацией 0,1 % объемом не менее  $50 \text{ см}^3$  пробу (гранулы удобрений или  $\text{NaNO}_3$ ) предварительно измельчают до размера не более 500 мкм для ускорения последующего растворения. Затем на аналитических весах взвешивают навеску массой порядка 0,05 г с точностью до 4 знаков после запятой, далее переносят ее в заранее взвешенный на технических весах стакан и добавляют рассчитанное количество воды для приготовления 0,1 мас. % раствора. После этого стакан помещают на мешалку на 30 мин для растворения образца. Полученный раствор фильтруют на складчатом фильтре «белая лента» и измеряют удельную электропроводимость дистиллированной воды и данного раствора с помощью кондуктометра (согласно документации на прибор).

Данную процедуру повторяют для трех параллельных навесок. Полученные результаты заносят в табл. 5.

**Экспериментальные данные по удельной  
электропроводимости растворов**

№ измерения	Вещество	Удельная электропроводимость, мкСм/см	
		раствор	вода
1			
2			
3			

После измерения проводимости раствор возвращают в общую емкость. Массу раствора взвешивают, а затем выпаривают его до сухого остатка. Горячий стакан помещают в эксикатор и охлаждают до комнатной температуры. Сухой остаток взвешивают, массу записывают и рассчитывают TDS по формуле:

$$TDS = (A - B)/V,$$

где  $A$  – масса сухого остатка в стакане, мг;  $B$  – масса сухого стакана, мг;  $V$  – объем выпаренного раствора, л.

Эксперимент проводят для трех навесок. Данные заносят в табл. 6.

**Экспериментальные данные по TDS**

№ измерения	Вещество	TDS, мг/л
1		
2		
3		

По полученным данным рассчитывают СИ согласно формуле (10). Для сравнения вычисляют СИ с использованием значений TDS по формуле:

$$TDS \left[ \frac{\text{мг}}{\text{л}} \right] = c \cdot k \left[ \frac{\text{мкСм}}{\text{см}} \right],$$

$$c = \frac{TDS}{k}.$$

Данные по рассчитанным СИ вносятся в общий Excel-файл. Значения СИ, полученные экспериментально, сводятся в табл. 7, после чего выполняется пересчет удельной электропроводимости в СИ по формуле (10).

Таблица 7

**Значения удельной электропроводимости и солевого индекса  
исследованных растворов, полученные экспериментальным  
и расчетным методами**

№	Удобрение	Удельная электропро- водимость, мкСм/см	Солевой индекс	
			Расчет- ный	Эксперименталь- ный
	1	2	3	4
1	Нитрат натрия	1605	100	100
2	МАФ, необработанный			
3	МАФ, обработанный			
4	МАФ, производ- ство «БМУ»			
5	ДАФ, обработанный			
6	ДАФ, необработанный			
7	ДАФ, производство «БМУ»			
8	НРК 15-15-15			
9	НРК 16-16-8			
10	НРК(S) 4-30-15			
11	NP+S 15-40+10			
12	NPS+S 13-33-6+7			
13	KCl			
14	НРК(S) 0-20-20(5)			

## Сравнение данных, полученных расчетным и экспериментальным методами

На этой стадии работы оценивают значения солевых индексов, рассчитанных по удельной электропроводимости и TDS из общего Excel-файла, и солевых индексов, рассчитанных другими способами.

По данным табл. 7 проводится сравнение полученных экспериментальных значений СИ с теоретическими. Значения теоретического и экспериментального СИ откладываются на гистограмме. Пример гистограммы представлен на рис. 5. Обработку данных рекомендуется проводить в электронных таблицах (например, Microsoft Excel).

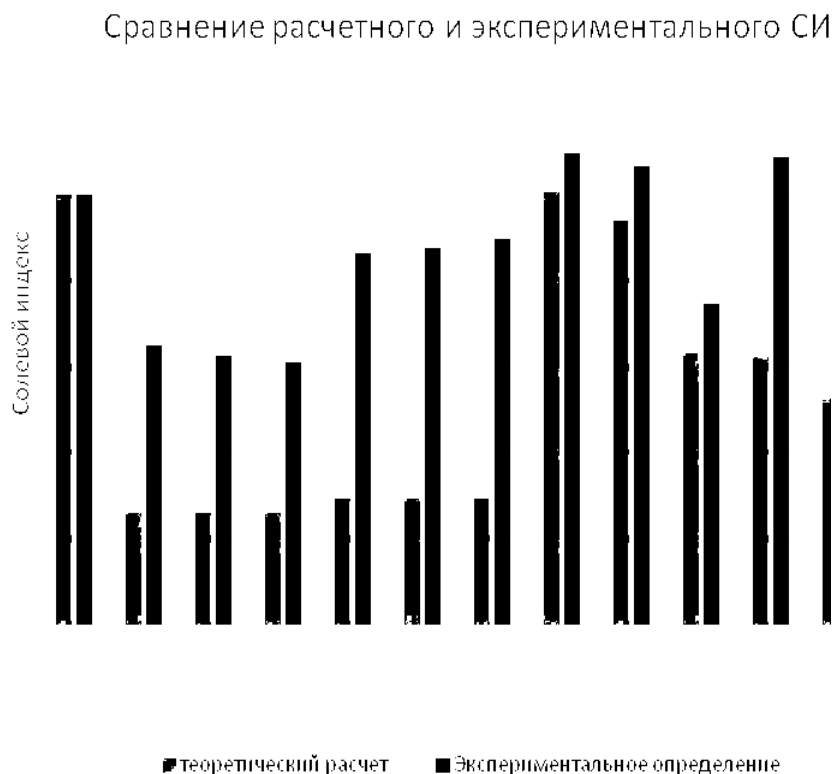


Рис. 5. Пример сравнения расчетного и экспериментального солевых индексов

Можно отметить, что в целом значения схожи, хотя абсолютные величины существенно различаются. Это обуславливается рядом факторов, которые были описаны ранее в лабораторных работах 1 и 2.

Далее по данным таблиц и графиков делаются выводы.

## **Структура и содержание отчета**

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Краткое описание хода работы.
5. Таблицы экспериментальных и расчетных данных. Расчеты с пояснениями.
6. Обсуждение результатов.
7. Метрологическая карта средств измерения.
8. Выводы.
9. Список литературы.

## **Контрольные вопросы**

1. Объясните сущность экспериментального метода определения СИ.
2. В чем состоят преимущества и недостатки экспериментального метода нахождения СИ?
3. В чем разница между проводимостью раствора и TDS?
4. Объясните порядок определения экспериментального метода нахождения СИ, используемый в данной работе.
5. Сравните теоретические и экспериментальные способы вычисления СИ и проведите их сравнительный анализ.

## Список литературы

ГОСТ 12026-76. Бумага фильтровальная лабораторная. Технические условия. Дата введения 1978-01-01. – Москва: ИПК «Издательство стандартов», 1976. – 7 с.

ГОСТ 24104-2001. Весы лабораторные. Общие технические требования. Дата введения 2002-07-01. – Москва: ИПК «Издательство стандартов», 2002. – 8 с.

ГОСТ 25336-82. Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Типы, основные параметры и размеры (с Изменениями № 1–4). Дата введения в действие последнего изменения 1990-07-01. – Москва: ИПК «Издательство стандартов», 1990. – 102 с.

ГОСТ 28311-89. Дозаторы медицинские лабораторные. Общие технические требования и методы испытаний. Дата введения 1990-07-01. – Москва: ИПК «Издательство стандартов», 1990. – 14 с.

ГОСТ 51568-99. Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. Дата введения 2000-03-01. – Москва: ИПК «Издательство стандартов», 2003. – 108 с.

ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия (с Изменениями № 1, 2). Дата введения 1974-01-01. – Москва: ИПК «Издательство стандартов», 1974. – 12 с.

Методика количественного химического анализа. Определение степени растворения минеральных удобрений № 1104-00209438. – Череповец: [б. и.], 2017. – 12 с.

Boman B. J., Stover E. W. Managing Salinity in Florida Citrus. – URL: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/ae171> (дата обращения: 11.05.2021).

Hoefl R. G., Walsh L. M., Liegel E. A. Effect of seed-placed fertilizer on the emergence (germination) of soybeans (*Glycine max* L.) and snapbeans (*Phaseolus vulgaris* L.) // *Communications in Soil Science & Plant Analysis*. – 1975. – Vol. 6. – № 6. – P. 655–664.

Jackson M. L. Soil chemical analysis. – New Delhi: Prentice Hall of India Pvt. Ltd., 1973. – 521 p.

Kamburova K., Kirilov P. Calculating the salt index of PK and NPK liquid fertilizers from potassium phosphates // *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*. – 2008. – Vol. 43. – № 2. – P. 227–230.

Laboski C. A. M. Understanding salt index of fertilizers // *Proceedings of the 2008 Wisconsin Fertilizer, Agrilime & Pest Management Conference*. – 2008. – Vol. 47. – P. 37–41.

Latifian M., Liu J., Mattiasson B. Struvite-based fertilizer and its physical and chemical properties // *Environmental Technology*. – 2012. – Vol. 33. – № 24. – P. 2691–2697.

Li X. et al. Response of a salt-sensitive plant to processes of soil reclamation in two saline-sodic, coastal soils using drip irrigation with saline water // *Agricultural Water Management*. – 2016. – Vol. 164. – P. 223–234.

Mellors W. K., Propts S. E. Effects of fertilizer level, fertility balance, and soil moisture on the interaction of two-spotted spider mites (Acarina: Tetranychidae) with radish plants // *Environmental Entomology*. – 1983. – Vol. 12. – Iss. 4. – P. 1239–1244.

Montcalm A. Calculating fertilizer salt index and effects of soil salt concentration on crop growth. – URL: <https://www.landbrugsinfo.dk/-/media/landbrugsinfo/public/e/f/7/2216-pl194578calculatingfertilizersaltindex.pdf> (дата обращения: 11.05.2021).

Mortvedt J. J. Calculating Salt Index. – URL: [https://www.spectrum-analytic.com/support/library/ff/salt\\_index\\_calculation.htm](https://www.spectrum-analytic.com/support/library/ff/salt_index_calculation.htm) (дата обращения: 11.05.2021).

Murray T. P., Clapp J. G. Current Fertilizer Salt Index Tables are Misleading // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 2004. – Vol. 35. – Iss. 19–20. – P. 2867–2873.

Rader Jr. L. F., White L. M., Whittaker C. W. The salt index – A measure of the effect of fertilizers on the concentration of the soil solution // *Soil science*. – 1943. – Vol. 55. – № 3. – P. 201–218.

Rutland D. W. Manual for Determining Physical Properties of Fertilizer (Reference Manual, IFDC-R-6). – Muscle Shoals, Alabama: Intl Fertilizer Development, 1986. – 91 p.

Understanding Salt Index. – URL: [https://www.precisionlab.com/resources/wuxal\\_understanding\\_salt\\_index.pdf](https://www.precisionlab.com/resources/wuxal_understanding_salt_index.pdf) (дата обращения: 11.05.2021).

Xu-shengl H. E. et al. Characteristics and performance of novel water-absorbent slow release nitrogen fertilizers // *Agricultural Sciences in China*. – 2007. – Vol. 6. – № 3. – P. 338–346.

Литературный редактор: *К. Г. Костыгина*  
Технический редактор: *В. В. Круглова*  
Лицензия А № 165724 от 11.04.06 г.

---

Подписано в печать 21.09.2021. Тираж 4 экз.  
Уч.-изд. л. 1,6 Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 2.  
Гарнитура «Таймс». Заказ .

---

162600, г. Череповец, пр. Луначарского, 5  
Череповецкий государственный университет