

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**И. М. Швед**

**ДИСПЕРГИРОВАНИЕ НАВОЗА В ЗАКРЫТЫХ  
НАВОЗОХРАНИЛИЩАХ МИКСЕРОМ  
С САМООЧИЩАЮЩИМИСЯ ЛОПАСТЯМИ**

Минск  
БГАТУ  
2020

**Швед, И. М.** Диспергирование навоза в закрытых навозохранилищах миксером с самоочищающимися лопастями / И. М. Швед. – Минск : БГАТУ, 2020. – 140 с.: ил. – ISBN 978-985-25-0045-6.

В монографии рассматриваются способы и технические средства для диспергирования жидкого навоза в навозохранилищах. Ключевое внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям по определению оптимальных конструкционно-технологических параметров миксера для навоза. В монографии представлены аналитические зависимости по определению параметров мешалки и технологических параметров миксера. Целью исследования было снижение энергоемкости процесса перемешивания жидкого навоза в навозохранилищах с обоснованием параметров и режимов работы рабочего органа миксера, обеспечивающих самоочистку лопастей.

Монография адресована научным работникам, преподавателям, аспирантам, студентам, а также широкому кругу специалистов, чья деятельность связана с проблематикой перемешивания жидкого навоза в навозохранилищах.

Табл. 25. Ил. 40. Библиогр.: 117 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
учреждения образования «Белорусский государственный  
аграрный технический университет»  
(протокол № 1 от 20 января 2020 г.)

*Рецензенты:*

заведующий отделом испытаний ГУ «Белорусская МИС» *В. Н. Панцаков*;  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии  
и механизации животноводства УО «Белорусский государственный  
аграрный технический университет» *А. В. Китун*;

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории  
механизации и автоматизации технологических процессов в свиноводстве  
и птицеводстве РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации  
сельского хозяйства» *Э. В. Дыба*

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ .....	6
1.1. Физико-механические свойства навоза .....	6
1.2. Классификация способов и средств для уборки, утилизации и переработки навоза .....	13
1.3. Способы хранения навоза .....	20
1.4. Анализ конструкций хранилищ для навоза и средств механизации .....	23
1.5. Анализ способов и оборудования для диспергирования жидкого навоза .....	28
1.6. Выводы по главе 1 .....	35
Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКСЕРА .....	37
2.1. Определение диаметра мешалки .....	37
2.2. Определение времени, при котором частицы навоза находятся на поверхности мешалки .....	42
2.3. Определение перемещаемого объема навозной массы на активном участке струи при работе миксера .....	44
2.4. Определение угла подъема лопасти мешалки .....	49
2.5. Определение производительности миксера для навоза .....	54
2.6. Определение скорости движения потока жидкого навоза под действием лопастей мешалки .....	58
2.7. Определение объемного расхода жидкого навоза лопастной мешалкой .....	62
2.8. Определение потребной мощности на диспергирование жидкого навоза .....	65
2.9. Выводы по главе 2 .....	74
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	79
3.1. Программа экспериментальных исследований .....	79
3.2. Экспериментальная установка для проведения исследований .....	79
3.3. Выбор и использование критериев оценки однородности диспергируемой навозной массы .....	82

3.4. Определение необходимого числа проб и минимально допустимой массы . . . . .	87
3.5. Определение качества смеси . . . . .	88
3.6. Экспериментальные исследования по определению рациональных режимов работы и параметров миксера для навоза . . . . .	90
3.6.1. Программа и методика исследований, обработка полученных экспериментальных данных . . . . .	90
3.6.2. Результаты исследования энергоемкости процесса диспергирования жидкого навоза миксером . . . . .	105
3.6.3. Результаты исследования затрат энергии на привод мешалки миксера . . . . .	112
3.7. Выводы по главе 3 . . . . .	118
<b>ГЛАВА 4. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ . . . . .</b>	<b>119</b>
4.1. Описание конструкции разработанного миксера с лопастной мешалкой . . . . .	119
4.2. Результаты производственных испытаний . . . . .	121
4.3. Экономическая оценка и реализация результатов исследований . . . . .	122
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .</b>	<b>124</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ . . . . .</b>	<b>125</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим условием дальнейшего повышения продуктивности животных и качества получаемой продукции является повышение надежности ветеринарного благополучия животноводческих хозяйств, которое зависит от многих факторов, в том числе от условий хранения, обработки и утилизации навоза.

В настоящее время достаточно острой является проблема повышения уровня заболеваемости животных, что связано с недостаточной степенью комфортности их содержания и загрязнением воздушного бассейна территории комплексов. В этой связи совершенствование технических средств и технологических решений для уборки и утилизации навоза приобретает первостепенное значение.

В монографии проведен сравнительный анализ конструкций хранилищ для навоза, способов и оборудования для диспергирования жидкого навоза. Описаны характерные особенности поиска, анализа исследований, сложности, возникающие при выборе оборудования, раскрыты аспекты диспергирования.

На основе проведенного анализа предложены способы решения указанных выше проблем, а также обоснована целесообразность использования погружного миксера с лопастной мешалкой для диспергирования жидкого навоза в закрытых навозохранилищах.

# ГЛАВА 1

## СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

### 1.1. Физико-механические свойства навоза

Навоз является поставщиком минеральных веществ, микроэлементов, которые необходимы для роста и развития растений. Он состоит из твердых и жидких выделений животных. Количество навоза определяется видом скота, его возрастом и массой, интенсивностью и рационом кормления [2].

Основными физико-механическими свойствами навоза, которые наиболее существенно влияют на работу оборудования для механизации уборки, обработки и хранения, а также на энергоемкость процесса выполнения названных операций, являются фракционный состав, влажность, плотность, угол естественного откоса, коэффициент трения, вязкость, напряжение сдвига, липкость, температура замерзания, коррозионная активность [1].

Фракционный состав навоза является обобщенной условной оценкой свойств материала, которая практически определяет выбор соответствующих способов уборки, хранения, обработки, а также технических средств выполнения операций, которые связаны с реализацией этих способов. В конечном итоге в экскрементах животных, а также в смеси их с подстилкой, присутствуют две фракции – твердая и жидкая. Фракционный состав навоза зависит преимущественно от способа содержания животных – на подстилке или без нее, количества используемой подстилки, длины ее частиц, вида животных. Жидкий навоз в покое расслаивается на наиболее плотные включения: нижний слой – осветленная жидкость, менее плотный – средний и верхний слой – поверхностная корка, которая составляет наименее плотные включения. Такое расслоение жидкого навоза усложняет его выемку из хранилищ, так как требует применения различных технических средств. Скорость расслоения зависит, в первую очередь, от влажности навоза.

Влажность навоза зависит преимущественно от количества сухих веществ в кормах и подстилке, количества подстилки, вида животных, их возраста. Различают относительную и абсолютную влажность навоза. На практике оперируют в основном показателями относительной влажности.

Относительную влажность навоза  $W$  рассчитывают по формуле:

$$W = \frac{W_B}{W_B + W_C} 100 \%, \quad (1.1)$$

где  $W_B$  и  $W_C$  – соответственно, масса воды и масса сухого вещества порции навоза, кг.

Абсолютную влажность навоза  $W_a$  можно определить из выражения:

$$W_a = \frac{W_B - W_C}{W_C} 100 \%. \quad (1.2)$$

В зависимости от влажности навоз условно делят на твердый (65 %–80 %), полужидкий (около 90 %), жидкий (90 %–93 %) и навозные стоки – более 93 % влажности [1, 6].

Относительную влажность жидкой фракции навоза  $W_{нж}$  (%) вычисляют по формуле

$$W_{нж} = Q_n W_n - \frac{Q_t W_t}{Q_n - Q_t}, \quad (1.3)$$

где  $Q_n, Q_t$  – соответственно, масса навоза и его твердой фракции, кг;

$W_n, W_t$  – соответственно, влажность навоза и его твердой фракции, %.

Плотность навоза зависит от его вида (табл. 1.1) [1].

Таблица 1.1

Значения плотности навоза в зависимости от его вида

Вид навоза	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Свежий солоmistый навоз	400–500
Слежалый навоз	700–1200
Жидкий навоз влажностью 90 %	1024
Жидкий навоз влажностью 92 %	1019
Жидкий навоз влажностью 94 %	1014
Жидкий навоз влажностью 96 %	1010

Анализ данных табл. 1.1 показывает, что плотность навоза уменьшается при увеличении его влажности. Также необходимо заметить, что способ уборки свежего и слежалого навоза отличается от способа уборки жидкого навоза.

Угол естественного откоса твердого навоза зависит от степени его перегнивания, влажности и составляет  $40^{\circ}$ – $50^{\circ}$  [1]. От угла естественного откоса зависит коэффициент бокового давления, величина которого влияет на нагрузку рабочих органов машин. Коэффициент  $K_6$  бокового давления определяется по формуле [1]:

$$K_6 = \text{ctg } \varphi, \quad (1.4)$$

где  $\varphi$  – угол естественного откоса, град.

Коэффициент трения навоза зависит преимущественно от его влажности, гранулометрического состава, степени перегнивания, давления на навоз подвижных рабочих органов. С увеличением давления из влажного навоза вытесняется жидкость, которая смазывает поверхность трения, и коэффициент трения уменьшается.

При расчете энергоемкости машин для уборки навоза используется как коэффициент трения покоя, так и коэффициент скольжения, который при скольжении соломистого навоза по металлу составляет 0,7–1,3, дереву – 0,6–1,2, по бетону – 0,6–1,4. Коэффициент трения покоя превышает коэффициент трения скольжения на 30 %–40 %, 15 %–30 % и 5 %–15 %, соответственно, для экскрементов, соломистого и торфяного навоза. При перемещении навоза крупного рогатого скота, когда влажность находится в пределах 60 %–75 %, коэффициент трения скольжения максимален [7]. Такая влажность является критической ( $W_{кр}$ ).

Если влажность отклоняется от критического значения, то коэффициент трения уменьшается. Для бесподстилочного навоза крупного рогатого скота максимальное значение коэффициента трения скольжения составляет 0,9, при  $W_{кр} = 64,4$  %, для навоза с соломенной подстилкой – 0,67 (71,4 %), с торфяной подстилкой – 1,06 (58,2 %) [6].

Коэффициент трения  $f$  свежего соломистого навоза крупного рогатого скота может быть вычислен следующим образом [6]:

$$f = A + B \lg \sigma, \quad (1.5)$$

где А и В – экспериментальные коэффициенты;

$\sigma$  – давление в плоскости сдвига, Па.

Вязкость и максимальное напряжение сдвига зависят от влажности (табл. 1.2) и температуры навоза. При увеличении температуры от 10 °С до 20 °С вязкость и напряжение сдвига уменьшаются на 25 %–40 % [1].

Таблица 1.2

Вязкость и максимальное напряжение сдвига жидкого навоза при температуре 18 °С

Влажность навоза, %	Навоз			
	свиней		дойных коров	
	Вязкость, Н·с/м <sup>2</sup>	Максимальное напряжение сдвига, Н/м <sup>2</sup>	Вязкость, Н·с/м <sup>2</sup>	Максимальное напряжение сдвига, Н/м <sup>2</sup>
88	0,40	20,0	1,00	50,0
89	0,32	15,0	0,80	40,0
90	0,28	9,0	0,60	37,0
91	0,22	5,0	0,30	14,0
92	0,20	1,8	0,45	5,0
93	0,15	1,6	0,10	2,5
94	0,10	0,9	0,08	1,0

Как видно из данных табл. 1.2, с увеличением влажности навоза максимальное напряжение сдвига и вязкость уменьшаются. Так, для жидкого свиного навоза вязкость составляет 0,15–0,28 Н·с/м<sup>2</sup> и 0,1–0,6 Н·с/м<sup>2</sup> – для коровьего. Напряжение сдвига для свиного жидкого навоза составляет 1,6–9,0 Н/м<sup>2</sup> и 2,5–37 Н/м<sup>2</sup> – для коровьего.

Значительное влияние на работу машин оказывает липкость навоза. Она характеризуется величиной усилия, необходимого для отрыва от навоза пластины площадью в 1 м<sup>2</sup>. В зависимости от влажности навоза и свойств поверхности контакта липкость навоза может составлять 420–1230 Н/м<sup>2</sup> (табл. 1.3) [6]. Максимальную липкость имеет свежий навоз влажностью 74 %–83 %. Липкость

также зависит от типа подстилки, поверхностей прилипания. При использовании на подстилку мелкой стружки и древесных опилок получается навоз плохого качества, который имеет низкое содержание азота и медленно разлагается, поэтому не принимаем его во внимание. После трех месяцев хранения липкость навоза уменьшается в 3–4 раза [1].

Таблица 1.3

Значения липкости  $P$ , Н/м<sup>2</sup>, навоза критической влажностью  $W_{кр}$ , %, в зависимости от материалов поверхностей

Поверхность	Вид навоза			
	без подстилки		подстилочный	
	$P$	$W_{кр}$	$P$	$W_{кр}$
Сталь	660	75,5	420	79,7
Бетон	860	80,5	640	74,7
Дерево	1230	82,5	920	79,3

Из данных табл. 1.3 видно, что напряжение прилипания навоза к таким материалам как сталь и бетон, меньше, чем к дереву. Это обусловлено тем, что у дерева больше шероховатость рабочей поверхности. Существенным недостатком металлической поверхности является то, что при низких температурах жидкий навоз замерзает на рабочих органах, что затрудняет их очистку.

Температура замерзания навоза играет существенную роль при работе оборудования на открытом воздухе. Если значения температуры составляют 1,1 °С–2,8 °С, то усилие отрыва примерзшего к оборудованию навоза увеличивается в 30–32 раза.

Коэффициент трения и липкость навоза необходимо учитывать при проектировании угла наклона скатных лотков в местах перегрузки навоза с одного уровня на другой, а также углов подъема винтовой линии лопастных мешалок, работающих при перемешивании навоза в навозохранилищах. Чем выше эти показатели, тем больше должны быть угол наклона скатного лотка и угол подъема винтовой линии лопасти мешалки [6].

Подстилка поглощает жидкую фракцию навоза, аммиачный азот. При малом количестве аммиачного азота теряются некоторые полезные вещества навоза. Подстилочный навоз имеет меньшую

влажность, чем жидкий, он более рыхлый, лучше перегнивает при хранении. Использование подстилки способствует поглощению мочи и влаги из помещений, где содержатся животные. Солома влажностью 13 %–24 %, опилки – 11 %–12 %, измельченные стружки – 11 %–12 % поглощают в 2–4 раза больше влаги, чем их масса, торф – в 5–7 раз [1, 7].

Навозную массу, в частности ее жидкую фракцию, характеризуют такими показателями, как химическая (ХПК) и биологическая (БПК) потребность кислорода. Эти показатели являют собой количество кислорода, которое необходимо для минерализации органических веществ 1 л навоза химическим окислением (ХПК) либо аэробным химическим разложением в течение пяти суток (БПК5) или до полного окисления (БПКп). Значения этих показателей взаимосвязаны и зависят от содержания органических веществ в навозе, которые составляют 75 %–85 % от общего количества сухого вещества. ХПК устанавливают путем использования в качестве окислителя бихромата калия  $K_2Cr_2O_7$ , который наиболее полно окисляет органические вещества сточных вод. При установлении БПК окисляется только часть органических веществ. Показатели БПК определяют из ХПК. Для навоза крупного рогатого скота  $БПК5 = 0,12 \cdot ХПК$  и  $БПКп = 0,35 \cdot ХПК$  [1, 2]. Величина этих показателей влияет на время перегнивания органических веществ, находящихся в навозной массе.

Навоз вызывает значительную коррозию металла рабочих органов, которые с ними контактируют, особенно стали. Коррозия зависит от состава навоза, марки стали и ряда других факторов [7].

Подстилочный навоз состоит из твердых и жидких выделений животных и подстилки. Состав и удобрительная ценность его зависят от вида животных, состава кормов, качества и количества подстилки и способа хранения навоза.

Не рекомендуется вносить в почву свежий подстилочный навоз, так как разложение органических веществ в почве сопровождается развитием большого количества микроорганизмов и потреблением ими растворимых соединений азота и фосфора из почвы. Внесение подстилочного навоза незадолго перед посевом может привести к снижению урожая первой культуры.

Применение подстилки для животных на крупных промышленных фермах требует больших затрат труда и сдерживает рост

производительности труда в животноводстве, поэтому для таких ферм рекомендуется бесподстилочное содержание животных.

При ограниченном использовании подстилочного материала (до 1 кг на корову в сутки) получается навоз с влажностью до 85 %–87 %. Накопление смеси твердых и жидких выделений животных при небольшом количестве подстилки позволяет полностью механизировать очистку животноводческих помещений. При бесподстилочном содержании животных получается бесподстилочный жидкий навоз – подвижная смесь кала, мочи и технологической воды. Такой навоз обладает текучестью и легко поддается перекачке по трубам самотеком и с помощью насосов. Количество и качество бесподстилочного навоза зависят от вида и возраста животных, типа кормления, продолжительности откорма или стойлового содержания, объема воды, расходуемой при уборке навоза, и технологии его накопления.

Потери органического вещества и азота при хранении бесподстилочного навоза значительно меньше, чем при хранении подстилочного навоза [1]. В бесподстилочном навозе не протекают процессы саморазогревания, его температура не повышается (зимой и весной она составляет около 10 °С, летом – 17 °С).

В бесподстилочном навозе от 50 % до 70 % азота находится в аммонийной форме, хорошо доступной растениям в первый период внесения. Поэтому коэффициент использования азота бесподстилочного навоза и действие его на урожай культур в год внесения выше, чем подстилочного навоза, а последствие, наоборот, слабее [7]. Фосфор и калий из навоза используются растениями не хуже, чем из минеральных удобрений. Бесподстилочный навоз по эффективности не уступает подстилочному, полученному из такого же количества исходной навозной массы.

Вылитый на ровную поверхность навоз растекается. В зависимости от влажности и состава наклон поверхности массива составляет от 1,5 % до 3,5 %. Это характеризуется реологическими (текучими) свойствами жидких фаз. Свиной навоз при одинаковом содержании сухого вещества более текуч, чем навоз КРС, что объясняется меньшим содержанием в нем коллоидных частиц [1]. Состав жидкого навоза приведен в табл. 1.4 [6].

Таблица 1.4

Состав жидкого навоза, %

Состав жидкого навоза	Навоз	
	крупного рогатого скота	свиней
Вода	88,5	89,5
Сухие вещества, в том числе	11,5	10,5
Органические	8,6	5,2
Азот общий	6,4	0,5
Азот аммиачный	0,25	0,35
Фосфор	0,2	0,25
Калий	0,45	0,24
Магний	0,1	0,1
Кальций	0,15	0,2
Натрий	0,12	0,1
Другие элементы	1,23	3,36

Как видно из данных табл. 1.4, навоз КРС содержит большее количество органических веществ, необходимых для роста и развития растения.

Недостатком бесподстилочного навоза является его систематическое перемешивание для поддержания всей массы в однородном состоянии. При перемешивании бесподстилочного навоза один раз в неделю потери органического вещества и азота за 4,5 месяца хранения увеличиваются почти вдвое, но и в этом случае они меньше, чем при хранении подстилочного навоза [6].

Для хранения навоза в каждом хозяйстве необходимо иметь навозохранилище с жижесборником.

## 1.2. Классификация способов и средств для уборки, утилизации и переработки навоза

Выбор способов и средств для уборки навоза из животноводческих помещений зависит в первую очередь от свойств навоза. Жидкий навоз убирают гидравлическим, механическим или комбинированным способами, твердый – механическим [2, 5].

При содержании коров на привязи без подстилки (или с небольшим ее количеством в виде опилок, торфа) навоз убирают из животноводческого помещения несколько раз в сутки и преимущественно перед каждым доением. Навоз коров, которых содержат без привязи в боксах на бесщелевых полах, убирают не менее двух раз в сутки. При содержании крупного рогатого скота на щелевых полах животные постоянно ногами продавливают навоз сквозь щели крышек каналов, которые имеются под этими полами. Из каналов навоз удаляют в зависимости от степени их заполнения. Если под животноводческим помещением находится навозохранилище, т. е. навоз можно непосредственно подать туда из помещения, то навоз из него убирают так же, как и при содержании скота на щелевых полах. Подпольное хранилище опорожняют 1–2 раза в год [5, 8, 9]. Такой же периодичности придерживаются при уборке навоза из помещений, в которых скот содержат на глубокой соломенной подстилке.

Основным недостатком такого способа уборки навоза является отсутствие эффективных средств механизации выгрузки его из подпольных навозохранилищ. Из существующих машин с этой целью возможно использование установок УВН-800 для выгрузки навоза из хранилищ длиной до 110 м и погрузки его в транспортные средства.

Бесподстилочный навоз убирают с пола станков два раза в сутки. Применяют два основных способа уборки навоза из помещений для содержания скота – гидравлический и механический. Используют также комбинированный способ, который сочетает в себе и тот, и другой. Отдельным можно считать способ уборки навоза из животноводческого помещения в хранилище под полом этого помещения.

Гидравлический способ используют при бесподстилочном содержании скота. Преимущественно его осуществляют как прямой смыв навоза с пола водой. Гидравлический способ бывает двух видов: самотечный и рециркуляционный. В свою очередь, самотечный смыв может быть непрерывным или периодическим (отстойно-лотковым, шиберным).

На крупных фермах и комплексах часто применяют гидравлические системы удаления навоза, которые по сравнению с механическими системами обладают рядом преимуществ (электробезопасность, эксплуатационная надежность, низкая металлоемкость и т. д.).

Прямой смыв заключается в том, что навоз смывается струей воды под давлением 0,2–0,3 МПа как с мест дефекации скота в навозные каналы животноводческих помещений, так и по этим каналам – за пределы названных помещений. Недостаток прямого смыва в том, что он значительно увеличивает влажность навоза в результате разбавления его водой (более 98 %). Воду подают в каналы по проложенным в них трубопроводам с насадками, размещенными через 10–20 м [2, 8].

Рециркуляционный смыв навоза сводится к тому, что его смывают чистой водой только в начале цикла, а затем – обеззараженной жидкой фракцией, которая получается в специальных отстойниках. Это позволяет уменьшить расход чистой воды. Недостаток рециркуляционного смыва в том, что требуются капитальные вложения на постройку отстойников, а также применение дополнительных агрегатов для того, чтобы смыть навоз обеззараженной жидкой фракцией.

Самотечное удаление навоза – это перемещение жидкого навоза по лоткам, каналам с наклонным дном или в результате гидравлического уклона под действием силы собственного веса. Лотковая система уборки навоза предусматривает наличие в зоне дефекации скота пола, под которым размещены лотки или каналы, закрытые сверху крышками со щелями или решетками. Через щели экскременты попадают в каналы, по которым стекают самотеком в заданном направлении. Установлено, что самотечное удаление навоза – надежный способ при бесподстильном содержании животных на щелевых полах и кормлении скота влажными (сочные, жом) или сухими кормами. Использование в рационе большого количества силоса и зеленой массы, богатых содержанием сырой клетчатки, значительно уменьшает текучесть навозной массы, а попадание в каналы остатков кормов (силоса, соломы, сена) нарушает работу системы. Поэтому при таких рационах самотечное удаление навоза применять не рекомендуется [9, 10].

На свиноводческих фермах и комплексах наиболее рациональным является гидравлический способ уборки навоза, так как жидкий навоз за счет его пластических свойств способен перемещаться на водяной подушке по каналу, что уменьшает затраты на эксплуатацию оборудования. Но такой способ требует повышенного расхода воды, от 50 до 100 л в сутки на одно животное, так как удаление навоза происходит периодически с помощью потока во-

ды. При этом навоз сильно разбавляется, что снижает его удобрительные качества. Также к недостаткам гидравлического способа можно отнести недостаточную герметичность шиберных заслонок, необходимость перемешивания, поддержание нормальной температуры брожения жидкого навоза (значения температуры навозной массы на дне канала – не ниже 12 °С).

Механический способ используют как при содержании скота без подстилки, так и на ней. Для этого применяют соответствующие механические устройства.

Для механической очистки от навоза животноводческих помещений используют много различных средств, которые классифицируют по назначению, способу исполнения рабочего процесса, типу направляющей колеи, типу привода [5, 9].

Механические средства в зависимости от назначения подразделяют следующим образом:

1) оборудование для подачи навоза от стойл, станков животноводческих помещений к приемным устройствам, расположенным вблизи этих помещений: скребковые транспортеры, скреперные установки, лотковосплавные, рециркуляционные системы;

2) машины и оборудование для подачи навоза от животноводческих помещений до мест его обработки и хранения: прицепы, насосы, скреперные, пневматические установки;

3) машины для перемещения навоза внутри построек для его обработки и хранения: козловые краны, бульдозеры, мобильные грейферные погрузчики, насосы.

В зависимости от способа выполнения рабочего процесса механические средства могут быть непрерывного, возвратно-поступательного, периодического действия. К первым принадлежат круговые скребковые транспортеры, ко вторым – бульдозеры, грейферные погрузчики, к третьим – скреперные установки, штанговые транспортеры.

В зависимости от типа рабочих органов механические средства удаления навоза классифицируют на скребковые, винтовые (шнековые) транспортеры, скреперные установки, ковшовые подъемники, грейферные погрузчики, бульдозеры, тросовые лопаты.

Отдельные группы составляют машины для перемещения жидкого, твердого, бесподстилочного, подстилочного навоза. В качестве действующей силы перемещения в таких машинах могут быть: воздух

(пневматические установки), гидравлический напор (нагнетательные насосы), механическое воздействие (механические устройства).

Механические устройства для утилизации навоза могут иметь электродвигатель, двигатель внутреннего сгорания, или приводиться в действие вручную.

Технологический процесс уборки и удаления навоза на фермах состоит из следующих основных операций: уборка в стойловых помещениях, транспортирование к местам хранения или переработки, хранение и утилизация [5].

В настоящее время при привязном и беспривязном содержании коров применяют подпольный способ уборки и хранения навоза. Сущность его состоит в том, что навоз в течение всего стойлового периода накапливается в траншеях, расположенных под щелевым полом. Глубина подпольного навозохранилища 4,5–5,0 м. Выгрузка навозной массы производится 1 раз в год в летнее время. Этот способ исключает всякие работы с навозом в течение всего стойлового периода. Разработаны и применяются проекты коровников, в которых навозное хранилище выполнено под всей площадью помещения, а его пол держится на опорных колоннах.

При беспривязном содержании крупного рогатого скота наилучшим является механический способ уборки навоза, так как он является наиболее эффективным для уборки длиноволокнистых включений подстилки. Данный способ отличается простотой и высокой надежностью, но затрудняет поддержание тепла в условиях низких температур (ниже минус 20 °С), а также требует освобождения помещений во время уборки.

При бесподстилочном содержании скота этот недостаток частично устраняется путем сооружения накопительных емкостей, в которые навоз поступает непосредственно с горизонтальных транспортеров. Затем его откачивают шнековыми, лопастными, фекальными и другими насосами или вакуумными цистернами.

Утилизация навоза организуется по двум направлениям:

- использование в качестве органического удобрения;
- переработка с целью получения биогаза и кормовых добавок скоту.

Переработку экскрементов в кормовые добавки ведут методом высушивания, биологическими методами. Однако в этом направлении нет на сегодняшний день отработанной технологии.

Перед внесением в почву навоз должен быть обработан.

Подстилочный (твердый) навоз обрабатывается наиболее просто. Его обеззараживают от яиц гельминтов и болезнетворной микрофлоры биотермическим методом. Для этого навоз укладывают в штабеля высотой 2 м и шириной 3,5 м. Под действием микроорганизмов температура в штабеле постепенно повышается до 50–60 °С, в результате чего за 1 месяц происходит обеззараживание навоза.

Если влажность навоза выше 75 %, его компостируют с торфом, соломой и другими наполнителями.

Утилизация жидкого навоза, получаемого при бесподстилочном содержании, наиболее сложна, так как в жидком навозе не происходит процесс самосогревания, в нем долго сохраняются возбудители болезней (даже выдержка в течение 8 месяцев не приводит к гибели возбудителей ящура, туберкулеза, сибирской язвы и др.).

Существуют следующие способы утилизации жидкого навоза:

- компостирование с торфом или соломой;
- разделение на твердую и жидкую фракции путем естественного отстоя и раздельное внесение их в почву в качестве удобрений (пассивное разделение);
- механическое разделение на твердую и жидкую фракции с последующим биотермическим обеззараживанием твердой фракции и биологической обработкой жидкой фракции путем аэрирования или использованием ее без аэрации для орошения;
- электрохимическое разделение жидкого навоза;
- аэрация жидкого навоза.

На небольших фермах наибольшее распространение получило непосредственное использование жидкого навоза в качестве удобрений. В этом случае его исследуют на отсутствие возбудителей, и если их обнаруживают, то производят обеззараживание (3 кг формальдегида на 1 т навоза) или проводят огневую стерилизацию погружными горелками [11].

На крупных свиноводческих фермах (комплексах) применяют разделение навоза на твердую и жидкую фракции. Жидкая фракция после соответствующей обработки (аэрации) используется для орошения полей. Твердая (после выдержки) также используется в качестве удобрения.

Наряду с разделением навоза на две фракции в ряде хозяйств применяют компостирование жидкого навоза. Для этой цели на

территории фермы строят цех или фабрику по приготовлению смесей из навоза, органических и минеральных добавок.

В ряде хозяйств применяют следующую технологию использования жидкого навоза. На определенном расстоянии от ферм (2–3 км) устраивают отстойники-накопители. Навоз в них подается по трубам насосами. Поступивший в отстойник в течение 45–60 дней навоз расслаивается: твердая часть оседает, а жидкая собирается в верхних слоях. Жидкую фракцию используют для орошения. А твердая фракция – за счет испарения и донного дренажа обезвоживается до 75 %–80 %. После 2-месячного подсушивания осадок вывозят на поле (рис. 1.1) [11].

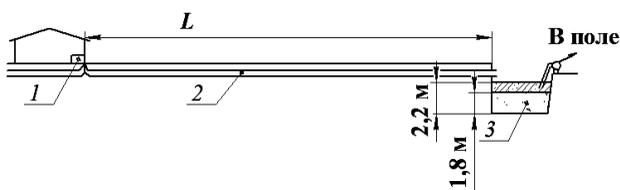


Рис. 1.1. Использование отстойника-накопителя:  
1 – насосная станция, 2 – трубопровод, 3 – отстойник-накопитель

Электрохимическое разделение жидкого навоза осуществляется под действием электрохимической коагуляции и электрофлотации. Этот способ применяют для дальнейшего осветления жидкой фракции. Для этой цели выпускаются электрокоагуляторы (рис. 1.2) [12].

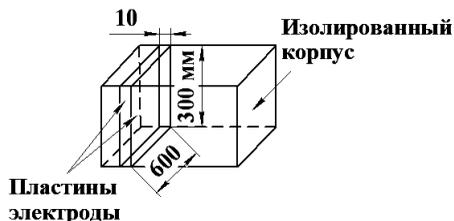


Рис. 1.2. Схема электрокоагулятора

В результате обработки жидкости в электрическом поле коллоидные частицы разноименно заряжаются, притягиваются друг

к другу и уплотняются. Вследствие уплотнения коллоидные частицы легко выпадают в осадок в отстойнике.

Основным недостатком способов по разделению жидкого навоза является то, что для развития процесса необходимо иметь влажность исходного навоза меньше 55 %.

Установлено, что получить в одном устройстве жидкую и твердую фракции, удовлетворяющие агротехническим, ветеринарным и мелиоративным требованиям с малыми затратами труда и энергии не удается. Причинами сложившегося положения являются большое изменение влажности исходного навоза (92 %–98 %), жесткие требования к получаемым продуктам разделения, необходимость высокой производительности в связи с обработкой большого количества навоза, несоответствие принципов действия используемых машин физико-механическим свойствам навоза, отсутствие показателей эффективности работы установок, способствующих повышению интенсивности разделения, снижению трудо- и энергозатрат и металлоемкости.

При очистке электрокоагуляцией жидкой фракции от взвешенных частиц химическими коагулянтами достигается высокая степень очистки, но большой расход коагулянтов, электроэнергии и низкая производительность сдерживают внедрение этих методов.

### **1.3. Способы хранения навоза**

Хранилища для навоза должны обеспечивать сохранность питательных веществ и повышение качества навоза как удобрения, а также возможность хранения его на протяжении всего периода, когда использование его в виде удобрений невозможно. Этот период зависит в основном от климатических условий района [5].

Для достижения надежного обеззараживания навоза его хранилища делят на изолированные одна от другой секции. Их может быть несколько, но не меньше двух. Секции заполняют навозом поочередно и хранят в каждой из них в течение необходимого карантинного периода, не смешивая со свежим навозом, который в этот период подают в другую секцию, целиком изолированную от уже заполненной.

Использовать на фермах и комплексах навозохранилища вынуждают, в первую очередь, невозможность круглогодичного внесения навоза в почву и требования охраны окружающей среды, в частности, необходимость его карантинирования перед внесением в почву. Выбор типа хранилища зависит от климатических условий, высоты стояния грунтовых вод, свойств навоза.

Размещают навозохранилища преимущественно на территории ферм, реже – в поле. Полевые хранилища предназначены в основном только для хранения навоза.

Навозохранилища могут быть наземными, заглубленными, полузаглубленными, открытыми, закрытыми, под помещениями.

Наземные хранилища оборудуют в основном в местах высоких грунтовых вод. Глубина полузаглубленных хранилищ составляет 1,5–2,0 м, закрытых заглубленных – до 6,0 м [13].

Секции хранилищ вмещают до 2000 т навоза и более. Периоды вывоза навоза с фермы, т. е. выгрузки его из хранилищ, необходимо согласовывать с возможностью непосредственного внесения его в почву. Длительность хранения навоза в хранилище составляет в основном 6–7 месяцев [13].

В районах с холодными зимами используют заглубленные закрытые хранилища навоза в виде пристроек к животноводческим помещениям или отдельных построек или хранят под полами названных помещений (подпольные хранилища).

Основное преимущество закрытых хранилищ заключается в контроле над уровнем запаха и полной защите от снега и дождя. Закрытые хранилища препятствуют выделению аммиака.

К недостатку хранилищ такого типа следует отнести увеличенные капиталовложения при его сооружении.

Хранилища не должны допускать фильтрации навоза в грунт. Конец трубопровода, по которому навоз поступает в хранилище, должен быть вровень со стеной хранилища, через которую он входит в это хранилище, размещен на высоте 1 м от дна и наклонен так, чтобы навоз мог вытекать из его конечной части в хранилище длиной не менее 5 м. Глубина закладки навозопровода в грунт должна превышать глубину его промерзания. Выполнение названных требований позволит избежать послонного намерзания навоза в хранилище, засорения выходного отверстия навозопровода и его размораживания.

Твердый навоз хранят и на наземных площадках-хранилищах с дном из монолитного железобетона и стенами из железобетонных блоков. По периметру площадки устраивают канавки, по которым жижа из навоза плывет в приемный резервуар насосной станции.

Открытые хранилища такого типа оборудуют в районах, где температура не ниже минус 20 °С. Они полузаглублены, выполнены из сборных железобетонных плит. Вместимость секционных навозохранилищ составляет 1–6 тыс. т, полевых – 1,3–14,4 тыс. т [13].

Основным недостатком открытых хранилищ является то, что они не препятствуют распространению запахов в окружающую среду и подвержены влиянию атмосферных осадков, увеличивающих влажность хранящейся навозной массы.

Хранят жидкий (влажность до 92 %) навоз крупного рогатого скота в монолитных железобетонных цилиндрических резервуарах вместимостью 5 тыс. м<sup>3</sup> каждый [13].

Подстилочный навоз хранят в наземных или полузаглубленных хранилищах вместимостью до 1,5 тыс. т. Наземные хранилища строят из бетона, кирпича, бута, сборных железобетонных элементов с деревянно-глинобитными стенами, полузаглубленные – в основном из таких же материалов [13].

Под полом животноводческих помещений (в основном, коровников) строят навозохранилища на всю длину и ширину помещения для содержания животных. Навоз проваливается в хранилище сквозь щели пола сам и продавливаются ногами животных. Убирать навоз из хранилища возможно в любое время, но лучше тогда, когда его можно сразу внести в почву [1].

Из проведенного анализа следует, что наилучшими характеристиками хранилищ для навоза обладают навозохранилища закрытого типа, так как резервуары открытого типа не препятствуют распространению запахов в окружающую среду. Хранилища закрытого типа, хотя и более затратны в изготовлении по сравнению с открытыми, имеют ряд преимуществ. Основное преимущество заключается в контроле уровня запаха и полной защите от снега и дождя, кроме того, закрытые хранилища препятствуют выделению аммиака.

#### **1.4. Анализ конструкций хранилищ для навоза и средств механизации**

На фермах с относительно малым поголовьем получают небольшие объемы жидкого навоза, однако для его переработки требуются значительные капиталовложения (стоимость строительной части навозохранилищ, цеха для разделения навоза, оборудования и т. п.), которые повышают удельные эксплуатационные затраты.

Наиболее дорогостоящим является использование отстойников-накопителей. Внедрение перспективной машинной технологии подготовки органических удобрений на основе жидкого навоза обеспечивает экономию средств от 1,5 до 2,1 раза в сравнении с существующей технологией. Экономия достигается снижением капитальных затрат на создание сооружений по обработке навоза. Улучшается экологическая обстановка за счет получения кондиционных продуктов и их использования в растениеводстве [12].

При выборе вида навозохранилища рекомендуется учитывать наличие рабочей силы, площадь застройки, уровень запаха, простоту содержания, совместимость с имеющимся оборудованием и системой навозоудаления. Обзор навозохранилищ с краткими техническими характеристиками представлен на рис. 1.3–1.8 [13].

Например, заглубленное навозохранилище (лагуна) с устройством забора жидкого навоза насосами (рис. 1.3). Для соблюдения санитарно-защитной зоны стенки и дно хранилища покрываются пленкой. Главным преимуществом такого навозохранилища является относительная дешевизна и возможность размещения при любом рельефе местности.

К недостаткам следует отнести возможность повреждения пленочного покрытия при использовании оборудования для диспергирования навозной массы в придонной области, что повлечет попадание навоза на землю и загрязнение прилегающих территорий.

Навозохранилище (лагуна) широко распространено в районах с тяжелыми глинистыми почвами и глубоким залеганием грунтовых вод. Для диспергирования жидкого навоза применяется миксер, радиус действия которого до 35 м. Для откачивания навозной массы применяют насосы с удлиненным валом, работающие со специально оборудованных подъездов [13].



*Рис. 1.3. Заглубленное навозохранилище (лагуна):  
1 – навозохранилище (лагуна); 2 – насосная станция; 3 – миксер для навоза*

Полностью закрытое бетонное навозохранилище часто используется при хранении жидкого навоза, и основное преимущество его заключается в контроле уровня запаха и полной защите от снега и дождя. На крышу хранилища возможно установить транспортер для удаления навоза, но она не рассчитана на возможное движение трактора или грузовика. Диспергирование навоза осуществляется погружным миксером для навоза, который устанавливается внутри хранилища [13].

Навозохранилище с наклонной крышей для жидкого навоза (рис. 1.4) рекомендуется к использованию при наличии в жидком навозе остатков подстилки. Крыша полностью исключает попадание осадков в емкости хранилища, что значительно снижает требуемые объемы.

Основным преимуществом хранилища является отсутствие необходимости постоянно освобождать хранилище для очередного притока жидкого навоза. Более того, такое хранилище не наносит вреда окружающей среде [13].

Для хранилищ такого типа можно применить мощные надежные в эксплуатации и менее энергоемкие механические мешалки. При

этом достигается хороший эффект диспергирования, направленный вертикально по отношению к течению навоза, без четкого диспергирования в направлении его течения.



*Рис. 1.4.* Навозохранилище с наклонной крышей

Недостатком подобного хранилища (рис. 1.4) является размер занимаемой им площади. Горизонтально расположенные навозохранилища ограничены по объему. Процесс диспергирования навозной массы затруднен, так как частицы навоза при диспергировании накапливаются в угловых зонах навозохранилища. Также существенным недостатком являются высокие теплотери из-за большой площади поверхности навозохранилища, что снижает температурный режим хранящегося навоза, следовательно, ухудшаются удобрительные свойства жидкого навоза [2].

Открытое цилиндрическое для жидкого навоза – одна из наиболее популярных систем хранения навоза. Хранилище оборудовано насосом для перекачивания жидкого навоза в транспортное средство или к месту его переработки.

Перед перекачиванием проводят диспергирование навоза миксером с целью разрушения слежавшегося осадка и получения однородной массы [14].

Наземное хранилище для жидкого навоза оборудовано насосом для перекачивания навоза, приводимого в действие валом отбора мощности. Хранилище позволяет хранить навоз без потери качест-

ва, оборудовано откачивающим насосом, позволяющим производить диспергирование навоза гидравлическим способом.

Однако в зависимости от типа жидкого навоза на его поверхности часто образуется толстая корка, которая останавливает распространение запаха, что исключено в хранилищах большого диаметра. Такая система хранения навоза и жижи не дает возможности хорошего диспергирования, в результате чего на дне хранилища накапливаются илистые отложения.

Закрытое эмалированное или оцинкованное хранилище для жидкого навоза представлено на рис. 1.5. Дно хранилищ – бетонное или стальное (сварное). Хранилище оснащается смотровым люком, выходным патрубком, переливным трубопроводом, лестницей с площадкой.



*Рис. 1.5.* Закрытое цилиндрическое хранилище для жидкого навоза

Вертикально расположенные хранилища жидкого навоза в большинстве случаев цилиндрические. В сравнении с горизонтальными навозохранилищами они имеют преимущество в компактности. Соотношение площади поверхности к объему уменьшает затраты материалов и теплопотери. В настоящее время вертикально расположенные хранилища строятся объемом до  $6000 \text{ м}^3$ .

Основными преимуществами цилиндрических навозохранилищ из металла являются долговечность, прочность и отсутствие утечек жидкого навоза, следовательно, они не несут опасности для окру-

жающей среды, водоемов и водозаборов. Также подобные навозохранилища легко монтируются и могут быть сразу введены в эксплуатацию. Компактные конструкции навозохранилищ дают возможность расположить их вблизи сооружений, где содержатся животные, что сокращает транспортные расходы.

К недостаткам следует отнести большую теплоотдачу в холодное время года, что приводит к необходимости периодически проводить диспергирование навозной массы для получения необходимой температуры брожения жидкого навоза.

Для диспергирования жидкого навоза предназначен погружной миксер. Миксер устанавливается на стойку и, благодаря роликовым направляющим, он может плавно погружаться и подниматься без трения. Для перенаправления потока диспергируемой навозной массы миксер может изменять угол направления движения жидкого навоза вверх или вниз.

Для загрузки и опораживания хранилищ используются погружные насосы, устанавливаемые на стойку с возможностью перемещения насоса в вертикальной плоскости. Насос позволяет перекачивать однородную навозную массу с остатками подстилки в жидком навозе.

Крыша хранилища препятствует распространению неприятного запаха и выделению аммиака в атмосферу, защищает емкости от заполнения атмосферными осадками. Хранилище при необходимости может быть использовано для хранения сенажа, в качестве ферментатора (метантенки) в биогазовых установках, емкости для пожарной воды, подстилки и сыпучих материалов.

Характеристика навозохранилищ различных типов приведена в табл. 1.5.

Анализ данных табл. 1.5 показал, что прямоугольные хранилища для жидкого навоза ограничены по площади и высоте, что снижает их вместимость, тогда как цилиндрические хранилища больше по высоте и не ограничены в диаметре.

Основным оборудованием, устанавливаемым в навозохранилищах, являются миксер для навоза и насос для перекачки жидкого навоза. Так как жидкий навоз расслаивается, то необходимо проводить его диспергирование, что затруднено в навозохранилищах прямоугольной формы из-за накопления частиц навоза в угловых зонах хранилища.

Таблица 1.5

## Характеристика навозохранилищ

Вид навозохранилища	Тип хранилища	Габаритные размеры, м			
		длина	ширина	высота (глубина)	Диаметр
Открытое цилиндрическое хранилище	Открытое	–	–	3–6	15, 18, 21
Надземное хранилище	Открытое	–	–	11	9
Заглубленное навозохранилище (лагуна)	Открытое	100, 120, 150	60–65	3–6	–
Бетонное навозохранилище	Закрытое	от 3,6 до 12,6	от 3,0	2,4–3,0	–
Навозохранилище с наклонной крышей	Закрытое	25, 30, 35	12	4–9	–
Цилиндрическое навозохранилище	Закрытое	–	–	3–6	4–32

Способ уборки, консервации и сохранности навозной массы в закрытых навозохранилищах, в сравнении с открытыми, резко сокращает загрязненность воздушной среды и водных ресурсов. Сохранность навозной массы в закрытых навозохранилищах за счет консервации и изоляции ее от внешних воздействий составляет 87 %–95 %, тогда как в открытых она не превышает 35 %–60 % [15].

### 1.5. Анализ способов и оборудования для диспергирования жидкого навоза

На крупных животноводческих комплексах выход жидкого навоза составляет около 30 тыс. т в год [11, 14]. Использование такого большого количества навоза возможно только при полной механизации и автоматизации всех процессов транспортировки, хранения и применения.

Современное сельское хозяйство предусматривает использование жидкого навоза во многих технологических процессах: внесе-

ние органических удобрений; подкормка растений; использование навозной массы как топлива. Применение жидкого навоза во всех перечисленных процессах возможно при его полном диспергировании до однородного состояния.

Диспергирование навоза – обязательный технологический прием, от которого в большой степени зависит надежность работы насосов, цистерн-разбрасывателей и дождевальных установок, полнота его выгрузки из хранилищ и равномерность распределения питательных элементов и органического вещества как в самом навозе, так и на удобряемой площади.

В настоящее время для получения однородной массы жидкого навоза используются машины для создания гомогенных систем с разным способом диспергирования, а приготовление их требует больших энергетических затрат.

Диспергирование жидкого навоза – процесс дробления частиц одной фазы в другой с равномерным распределением раздробленных частичек во всем объеме системы.

Широкое использование жидких однородных (гомогенных) систем в различных отраслях народного хозяйства привело к созданию диспергирующей аппаратуры самых различных конструкций. В большинстве случаев аппаратура создается без должного теоретического обоснования, поэтому не отвечает тем условиям, для которых она предназначена. С этой целью необходимо классифицировать известные способы диспергирования жидкостей, теоретически обосновать работу отдельных групп аппаратов, дать сравнительную оценку, что позволит научно подойти к разработке и подбору диспергирующей аппаратуры для различных видов навоза.

Выбор того или иного способа диспергирования жидкого навоза зависит от его влажности, содержания в нем поверхностно-активных веществ, требований к качеству конечного продукта.

Известны следующие способы диспергирования: электрический, химический, ультразвуковой, механический, пневматический, гидравлический и комбинированный.

Однако такие способы, как электрический, химический, применяются чрезвычайно редко и главным образом в лабораторных опытах для получения дисперсных систем в небольших количествах, так как требуют больших затрат энергии [5].

Ультразвуковые способы затрачивают на диспергирование жидкого навоза до  $20 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$  и более, однако соответствующие аппараты малопроизводительны, сложны в использовании на сельскохозяйственных предприятиях, в связи с чем пока считаются нерациональными [5].

Гидравлический способ (рис. 1.6) не нашел широкого применения при диспергировании жидкого навоза, так как механизм диспергирования жидкостей в струйных аппаратах чрезвычайно сложен.

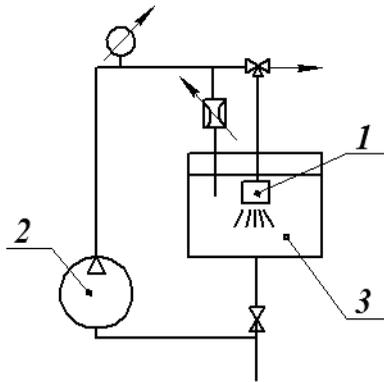


Рис. 1.6. Схема гидравлического способа диспергирования жидкого навоза:  
1 – сопло для подачи жидкого навоза; 2 – насос; 3 – навозохранилище

Рабочий процесс диспергирования жидкого навоза гидравлическим способом заключается в следующем. Струя жидкости под давлением внедряется в жидкий навоз. Так как скорости потока струи жидкости больше, чем поток жидкого навоза в навозохранилище, происходит его диспергирование до гомогенного состояния с разрушением слежавшегося нижнего слоя.

Основной недостаток такого способа в том, что давление жидкости, следовательно, и скорость жидкости, подаваемой в навоз, постепенно затухает и не может хорошо разрушить толстый поверхностный слой.

В современных навозохранилищах применяется установка для диспергирования жидкого навоза посредством воздействия на навозную массу подвижными рабочими органами миксера (рис. 1.7).

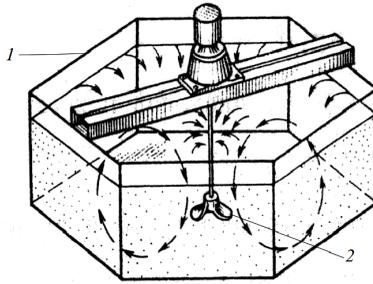


Рис. 1.7. Механический способ диспергирования жидкого навоза:  
1 – навозохранилище; 2 – миксер

Такой способ диспергирования не позволяет получить достаточно высокий градиент скоростей в слоях жидкости, поэтому используется для получения гомогенной среды энергоемкостью до  $4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ .

Технико-экономические показатели способов диспергирования жидкого навоза приведены в табл. 1.6 [5].

Таблица 1.6

Технико-экономические показатели способов диспергирования жидкого навоза

Способ диспергирования жидкого навоза	Удельная энергоемкость, $\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$	Металлоемкость, $\text{кг}/\text{м}^3$	Воздействие на среду
Механический	0,10–4,00	2,0	+
Гидравлический	0,12–5,00	1,8	–
Пневматический	0,15–10,00	3,2	+
Комбинированный	0,12–7,00	2,2	+

Анализ данных табл. 1.6 показал, что пневматический и комбинированный способы диспергирования жидкого навоза наиболее металлоемки и энергоемки, что требует больших затрат энергии. Наименее металлоемки механический и гидравлический способы диспергирования жидкого навоза.

Гидравлический способ менее металлоемок, но энергоемкость технологического процесса диспергирования больше по сравнению

с механическим способом. При подаче дополнительной жидкости в среду навозной массы снижается качество жидкого навоза.

Наиболее рациональным является механический способ диспергирования, так как имеет наименьшую энергоемкость (до  $4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ ) с хорошим воздействием рабочих органов миксера на хранящуюся навозную массу.

Очевидно, что для получения однородной массы навоза наиболее рациональным является механический способ диспергирования жидкого навоза, рабочий процесс которого осуществляется лопастной мешалкой миксера.

Для реализации данного способа диспергирования жидкого навоза применяются миксеры. Эти механические средства используются для диспергирования навоза в резервуаре до достижения однородной консистенции перед подачей на сепаратор или погрузкой его в транспортное средство, что позволяет перекачивать навоз без разрыва потока. Без диспергирования твердая фракция навоза оседала бы на дне приемного резервуара, а насос перекачивал бы только жидкую фракцию.

Рабочим органом, обеспечивающим диспергирование навоза, в миксере является мешалка, привод которой может осуществляться от электродвигателя или от вала отбора мощности (ВОМ) трактора. Миксеры оборудуются подъемником для облегчения сервиса и чистки, а также возможности диспергирования на разных глубинах резервуара [9, 16].

По конструктивному исполнению миксеры, применяемые в цилиндрических навозохранилищах, бывают наклонные и погружные.

Наклонный миксер (рис. 1.8) разработан для эксплуатации в агрессивных условиях внутри навозохранилища. Рабочим органом миксера является двух- и трехлопастная мешалка. Сам миксер монтируется с внешней стороны стены навозохранилища и поддерживается при помощи двух верхних реек либо реечной передачей, что позволяет устанавливать любой угол наклона.

Существенным недостатком такого миксера является сложность диспергирования жидкого навоза при большой высоте навозохранилища вследствие небольших скоростей потока жидкого навоза, что снижает вероятность разрушения поверхностного слоя.

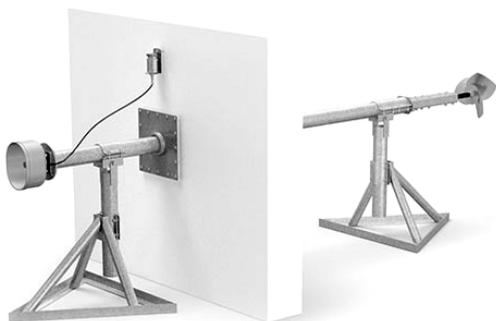


Рис. 1.8. Наклонный миксер

Погружные миксеры серии ТВМ (рис. 1.9) применяются для диспергирования и усреднения густых агрессивных жидкостей с высокой концентрацией сухих веществ [9, 16]. Преимуществом конструкции миксера являются небольшие габаритные размеры, что позволяет устанавливать его в угловых зонах прямоугольных навозохранилищ.

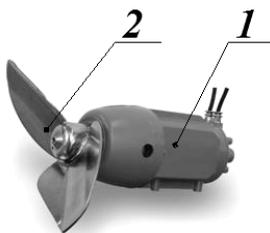


Рис. 1.9. Погружной миксер серии ТВМ:  
1 – герметичный корпус; 2 – лопастная мешалка

К недостаткам следует отнести слабое диспергирование жидкого навоза при увеличении его вязкости вследствие включения в состав элементов подстилки.

Погружные миксеры FAN MSX и FAN MSXH (рис. 1.10) соответствуют требованиям, предъявляемым к оборудованию, применяемому в биогазовых установках. Они подходят для диспергирования жидкостей с содержанием твердых частиц типа соломы, волокон и т. п.

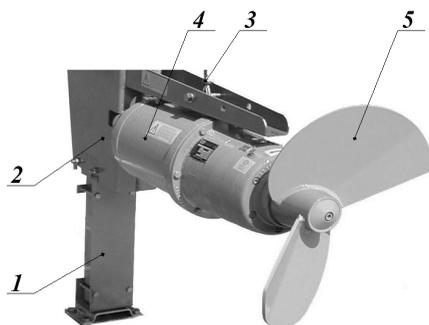


Рис. 1.10. Погружной миксер фирмы FAN:  
 1 – стойка; 2 – кронштейн; 3 – электрический кабель;  
 4 – герметичный корпус; 5 – лопастная мешалка

Преимуществами миксера являются легкость управления и высокая надежность. Привод осуществляется от трехфазного электродвигателя, мощность которого, в зависимости от исполнения, может быть 7, 5, 11 или 15 кВт [17–20].

Основным недостатком миксера является низкая самоочищающаяся способность при налипании частиц навоза вследствие увеличенного угла подъема винтовой линии лопасти мешалки, что приводит к росту энергоемкости процесса диспергирования жидкого навоза и снижению его производительности в целом.

Техническая характеристика погружных миксеров приведена в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Техническая характеристика погружных миксеров

Наименование оборудования	Максимальная выходная мощность, кВт	Напряжение/частота, В/Гц	Максимальная производительность, м <sup>3</sup> /ч	Максимальный объем емкости, м <sup>3</sup>
Миксер серии EYS	11,0	380/50	5500	2300
Миксер серии TBM	0,75–18,50	380/50	318–6702	4000
FAN MSXH 5,5	5,5	400/50	1500	900
FAN MSXH 7,5	7,5	400/50	2350	1400
FAN MSXH 11/Еco	11,0	480/60	3200	2400
FAN MSXH 15	15,0	400/50	3450	2800

Анализ данных табл. 1.7 показал, что наименьшая энергоемкость процесса диспергирования жидкого навоза достигается миксером серии FAN MSXH 7,5 при производительности 2350 м<sup>3</sup>/ч и потребляемой мощности 7,5 кВт.

Недостатком погружных миксеров является то, что с увеличением диаметра навозохранилища снижается его диспергирующая способность в периферийных зонах вследствие снижения скорости потока жидкого навоза, что требует установки дополнительных миксеров. Так, при диаметре навозохранилища свыше 10 м необходимо устанавливать не менее двух миксеров, при диаметре навозохранилища 30 м устанавливают 3 миксера, что увеличивает энергоемкость процесса диспергирования жидкого навоза.

Анализ конструкций миксеров показал, что для диспергирования навоза в закрытых навозохранилищах целесообразно использовать погружной миксер с лопастной мешалкой. Такие миксеры имеют большую производительность и эффективность смешивания посредством того, что могут перемещаться в вертикальной плоскости по закрепленной консоли. Это дает возможность диспергировать фракции жидкого навоза на разных уровнях навозохранилища, создавая при этом встречные потоки жидкого навоза, что является непременным условием для качественного диспергирования различных сред.

Вместе с тем недостатки существующих миксеров свидетельствуют о необходимости совершенствования рабочего органа путем обоснования рабочих параметров мешалки, что позволит снизить энергоемкость процесса диспергирования жидкого навоза в закрытых цилиндрических навозохранилищах и метантенках биогазовых установок.

## **1.6. Выводы по главе 1**

1. Лучшим решением по хранению жидкого и полужидкого навоза являются цилиндрические навозохранилища закрытого типа. Емкость хранилища должна быть достаточной для хранения навоза на ферме в течение зимнего периода (6–7 мес.).

2. Уборка и утилизация навоза из животноводческих помещений зависит от способа содержания скота, физико-механических и реологических свойств навоза, способов его переработки, а также мест его хранения. Жидкий навоз при хранении легко расслаивается, что приводит к необходимости его диспергирования.

3. Анализ способов диспергирования жидкого навоза показал, что наиболее рациональным является механический способ, удельная энергоёмкость которого до  $4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ . Воздействие на жидкий навоз вращающейся мешалки создает встречный поток жидкого навоза, что является необходимым условием для его качественного диспергирования. Лопасти мешалки при попадании на них твердых включений, находящихся в навозе, разрушают их.

4. Таким образом, обзор и проведенный анализ миксеров показал, что для диспергирования навоза в закрытых навозохранилищах целесообразно использовать погружной миксер с лопастной мешалкой. При создании лопастных мешалок, предназначенных для диспергирования навоза, необходимо учитывать физико-механические свойства навоза – коэффициент трения и липкость. Миксеры данного типа производительны и имеют возможность перемещаться в вертикальной плоскости по закрепленной консоли, что дает возможность диспергировать слои жидкого навоза на разных уровнях навозохранилища.

Погружной миксер способен поворачиваться на небольшие углы, направляя при этом поток жидкого навоза под углом вверх или вниз, что создает условия для разрушения коркового верхнего и илистого нижнего слоя жидкого навоза.

Создание миксера, обеспечивающего разнонаправленные потоки жидкого навоза при минимальных удельных затратах энергии на выполняемый процесс в закрытых цилиндрических навозохранилищах и метантенках биогазовых установок, является непременным условием для увеличения энергетической отдачи навоза.

## **ГЛАВА 2**

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКСЕРА**

Эффективное проектирование цилиндрических навозохранилищ с механическим способом диспергирования навозной массы базируется на практических знаниях, физико-механических свойствах жидкого навоза, конструктивных и технологических параметрах миксера.

Механический способ диспергирования навозной массы осуществляется путем создания многократных циркуляционных потоков в навозохранилище. Объемный расход жидкого навоза в хранилище происходит при движении навозной массы по замкнутому контуру, при этом в процессе работы миксера жидкий навоз внедряется в хранящуюся массу навоза в виде затопленной струи, создаваемой лопастью мешалки.

Мешалка миксера требует обоснования ее параметров в соответствии с размерами и формой навозохранилища, чтобы обеспечивать качественное диспергирование хранящегося жидкого навоза во всех его зонах.

#### **2.1. Определение диаметра мешалки**

При вращении лопасти мешалки увлекают за собой в движение компоненты жидкого навоза, создавая поток навозной массы (рис. 2.1).

Для определения диаметра мешалки рассмотрим силы (рис. 2.1), которые воздействуют на частицу при перемещении ее по рабочей поверхности лопасти мешалки. В процессе диспергирования частицы навоза поступают в рабочую зону мешалки, где подвергаются воздействию рабочей поверхности лопасти. При этом частицы начинают двигаться с относительной скоростью и перемещаться в радиальном направлении.

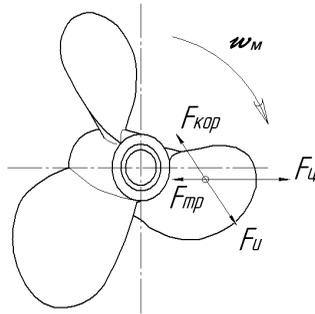


Рис. 2.1. Схема сил, приложенных на частицу навоза:  
 $F_{ин}$  – сила инерции;  $F_{тр}$  – сила трения;  $F_{ц}$  – центробежная сила;  
 $F_{кор}$  – Кориолисова сила

Одновременно они приобретают переносную скорость, действием которой увлекаются в круговое движение. При этом на частицу, перемещающуюся по рабочей поверхности мешалки, действуют следующие силы:

– сила трения частицы о рабочую поверхность мешалки [2]:

$$F_{тр} = fmg, \quad (2.1)$$

где  $f$  – коэффициент трения навоза по металлу;

$m$  – масса частицы навоза, кг;

$g$  – ускорение силы тяжести,  $m/c^2$ ;

– центробежная сила:

$$F_{ц} = m\omega_M^2 r_M, \quad (2.2)$$

где  $\omega_M$  – угловая скорость мешалки,  $c^{-1}$ ;

$r_M$  – радиус мешалки, м;

– Кориолисова сила:

$$F_{кор} = 2m\omega_M \frac{dr_M}{dt}, \quad (2.3)$$

где  $\frac{dr_M}{dt}$  – скорость движения частицы навоза, м/с.

Из рассмотренных сил, действующих на частицу, можно записать дифференциальное уравнение движения частицы навоза:

$$m \frac{d^2 r_M}{dt^2} - m \omega_M^2 r_M + 2 f m \omega_M \frac{dr_M}{dt} = -fmg, \quad (2.4)$$

где  $m \frac{d^2 r_M}{dt^2}$  – сила инерции, Н.

Полученное уравнение является линейно-неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Его общее решение состоит из суммы общего решения однородного уравнения (2.5) и частного решения полного уравнения (2.4):

$$\frac{d^2 r_M}{dt^2} - \omega_M^2 r_M + 2 f \omega_M \frac{dr_M}{dt} = 0. \quad (2.5)$$

Решив уравнение (2.5), определим радиус мешалки миксера:

$$r_M = C_1 e^{-\left(f\omega_M + \omega_M \sqrt{f^2 + 1}\right)t} + C_2 e^{-\left(f\omega_M - \omega_M \sqrt{f^2 + 1}\right)t}, \quad (2.6)$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные коэффициенты.

Находим частное решение неоднородного уравнения (2.4).

При  $r_M = C$  имеем  $\frac{d^2 r_M}{dt^2} = 0$  и  $\frac{dr_M}{dt} = 0$ . Тогда уравнение (2.4) примет вид:

$$0 - \omega_M^2 C + 0 = -fg, \text{ откуда } C = \frac{fg}{\omega_M^2}.$$

Таким образом, искомое общее решение уравнения (2.4) имеет вид:

$$r_M = C_1 e^{-\left(f\omega_M + \omega_M \sqrt{f^2 + 1}\right)t} + C_2 e^{-\left(f\omega_M - \omega_M \sqrt{f^2 + 1}\right)t} + \frac{fg}{\omega_M^2}. \quad (2.7)$$

Постоянные интегрирования находим по начальным условиям.

При начальных условиях  $t = 0, r_M = r_0, \frac{dr_M}{dt} = 0$ . Получим:

$$\begin{cases} r_0 = C_1 + C_2 + \frac{fg}{\omega_M^2}, \\ -C_1\omega_M(f + \sqrt{f^2 + 1}) - C_2\omega_M(f - \sqrt{f^2 + 1}) = 0. \end{cases} \quad (2.8)$$

Решим систему уравнений относительно  $C_1$  и  $C_2$ :

$$\begin{cases} C_1 = r_0 + \frac{f(fg - r_0\omega_M^2) - \sqrt{f^2 + 1}(fg + r_0\omega_M^2)}{2\omega_M^2\sqrt{f^2 + 1}}, \\ C_2 = -\frac{(f + \sqrt{f^2 + 1}) \cdot (fg - r_0\omega_M^2)}{2\omega_M^2\sqrt{f^2 + 1}}. \end{cases} \quad (2.9)$$

Тогда, решив выражение (2.7), получим уравнение радиуса мешалки миксера (формула (2.4)):

$$\begin{aligned} r_M = & \left( r_0 + \frac{f(fg - r_0\omega_M^2) - \sqrt{f^2 + 1}(fg + r_0\omega_M^2)}{2\omega_M^2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{-\left(f\omega_M + \omega_M\sqrt{f^2 + 1}\right)} - \\ & - \frac{(f + \sqrt{f^2 + 1}) \cdot (fg - r_0\omega_M^2)}{2\omega_M^2\sqrt{f^2 + 1}} e^{-\left(f\omega_M - \omega_M\sqrt{f^2 + 1}\right)} + \frac{fg}{\omega_M^2}. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Тогда диаметр мешалки

$$\begin{aligned} d_M = & 2 \left[ \left( r_0 + \frac{f(fg - r_0\omega_M^2) - \sqrt{f^2 + 1}(fg + r_0\omega_M^2)}{2\omega_M^2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{-\left(f\omega_M + \omega_M\sqrt{f^2 + 1}\right)} - \right. \\ & \left. - \frac{(f + \sqrt{f^2 + 1}) \cdot (fg - r_0\omega_M^2)}{2\omega_M^2\sqrt{f^2 + 1}} e^{-\left(f\omega_M - \omega_M\sqrt{f^2 + 1}\right)} + \frac{fg}{\omega_M^2} \right]. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Из формулы (2.11) видно, что при определении диаметра мешалки миксера необходимо учитывать динамический характер процессов, происходящих при диспергировании различных сред в рабочей зоне мешалки, физико-механические свойства этих сред и параметры мешалки, при увеличении угловой скорости диаметр мешалки также увеличивается.

Для определения диаметра мешалки построим график зависимостей (рис. 2.2) диаметра мешалки от коэффициента трения навоза и частоты вращения мешалки.

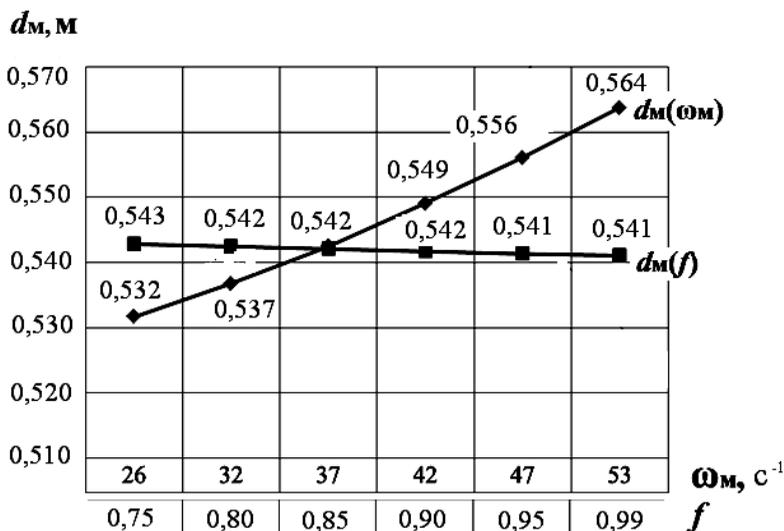


Рис. 2.2. График зависимостей диаметра мешалки от коэффициента трения навоза и частоты вращения мешалки

Из данных графика (рис. 2.2) видно, что при увеличении частоты вращения мешалки необходимо увеличивать ее диаметр и что при увеличении коэффициента трения навоза диаметр мешалки уменьшается.

В результате расчета (при  $r_0 = 130$  мм,  $f = 0,8$ ,  $\omega_m = 36,63$ ) по полученному выражению (2.11) и проведенного анализа данных рис. 2.2 определен диаметр мешалки миксера ( $d_m = 542$  мм), применяемого в закрытых цилиндрических навозохранилищах.

## 2.2. Определение времени, при котором частицы навоза находятся на поверхности мешалки

Для определения времени, при котором частицы навоза находятся на поверхности мешалки, рассмотрим сумму общего решения однородного уравнения (2.5):

$$\frac{d^2 r_M}{dt^2} - \omega_M^2 r_M + 2f\omega_M \frac{dr_M}{dt} = 0.$$

Полученное уравнение является линейным однородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами.

Его решение ищем в виде  $r_M = e^{nt}$ , подставляя это выражение для  $r_M$  в формуле (2.5) с учетом, что  $\frac{dr_M}{dt} = ne^{nt}$ ,  $\frac{d^2 r_M}{dt^2} = n^2 e^{nt}$ , получаем характеристическое уравнение. Дифференцируя выражение (2.5), получим:

$$n^2 + 2f\omega_M n - \omega_M^2 = 0.$$

Решение этого квадратного уравнения дает два корня для  $n$ :

$$n_{1,2} = -f\omega_M \pm \sqrt{f^2\omega_M^2 + \omega_M^2} = -\omega_M \left( f \pm \sqrt{f^2 + 1} \right),$$

тогда для  $r_M$  получаем два независимых решения:

$$r_1 = e^{-\omega_M \left( f - \sqrt{f^2 + 1} \right) t} \quad \text{или} \quad r_1 = e^{\omega_M \left( \sqrt{f^2 + 1} - f \right) t}, \quad (2.12)$$

$$r_2 = e^{-\omega_M \left( f + \sqrt{f^2 + 1} \right) t}. \quad (2.13)$$

Общим решением уравнения (2.5) является линейная комбинация этих двух независимых решений. При решении получаем радиус, который описывает частица навоза при вращении мешалки:

$$r_{\text{ч}} = C_1 e^{-\omega_{\text{м}}(f + \sqrt{f^2 + 1})t} + C_2 e^{\omega_{\text{м}}(\sqrt{f^2 + 1} - f)t}. \quad (2.14)$$

По начальным условиям находим коэффициенты интегрирования, т. е. при  $t = 0$ ,  $r_{\text{м}} = r_0$  и  $\frac{dr_{\text{м}}}{dt} = 0$ .

Тогда, решив уравнение (2.14), получим радиус, который описывает частица навоза при вращении мешалки:

$$r_{\text{ч}} = \frac{r_0(\sqrt{f^2 + 1} - f)}{2\sqrt{f^2 + 1}} e^{-\omega_{\text{м}}(f + \sqrt{f^2 + 1})t} + \frac{r_0(f + \sqrt{f^2 + 1})}{2\sqrt{f^2 + 1}} e^{\omega_{\text{м}}(\sqrt{f^2 + 1} - f)t}. \quad (2.15)$$

Далее принимаем во внимание, что при удалении частиц жидкого навоза за пределы лопастей мешалки радиальная составляющая скорости и частиц резко падает. В основном будет только окружная (тангенциальная) составляющая скорости частиц.

Таким образом, можно принять, что на поверхности мешалки (на границе) радиальная составляющая скорости (приблизительно) равна нулю. Радиальную составляющую скорости частиц определим, беря производную от  $r_{\text{ч}}$  по времени:

$$\begin{aligned} \frac{dr_{\text{ч}}}{dt} = & -\frac{r_0(\sqrt{f^2 + 1} - f)\omega_{\text{м}}(f + \sqrt{f^2 + 1})}{2\sqrt{f^2 + 1}} e^{-\omega_{\text{м}}(f + \sqrt{f^2 + 1})t} + \\ & + \frac{r_0(f + \sqrt{f^2 + 1})\omega_{\text{м}}(\sqrt{f^2 + 1} - f)}{2\sqrt{f^2 + 1}} e^{\omega_{\text{м}}(\sqrt{f^2 + 1} - f)t}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Второй член в выражении (2.16) со временем по экспоненте растет и стремится к бесконечности при  $t \rightarrow \infty$ , при этом скорость не может сделаться равной нулю, что неадекватно реальному положению вещей (в силу сказанного выше).

Из этого следует, что второе независимое решение выражения (2.13) дифференциального уравнения (2.5) за пределами мешалки не является физическим и может быть отброшено. Соответственно отбросим второй член в выражении для скорости частиц (уравнение (2.16)). Скорости частиц на поверхности мешалки близки к нулю. Тогда справедливо следующее уравнение:

$$\frac{dr_{\text{ч}}}{dt} = -\frac{r_0 \omega_{\text{м}}}{2\sqrt{f^2 + 1}} e^{-\omega_{\text{м}}(f + \sqrt{f^2 + 1})t} \approx 0. \quad (2.17)$$

Разложим выражение слева в уравнении (2.17) в ряд и ограничимся первым приближением. Тогда получим следующее выражение:

$$1 - \omega_{\text{м}}(f + \sqrt{f^2 + 1})t = 0. \quad (2.18)$$

Отсюда находим время, при котором частицы навоза находятся на поверхности мешалки:

$$t = \frac{1}{\omega_{\text{м}}(f + \sqrt{f^2 + 1})}. \quad (2.19)$$

Таким образом, можно заметить, что время, при котором частицы навоза находятся на поверхности мешалки, зависит от частоты вращения мешалки и коэффициента трения диспергируемой массы жидкого навоза.

### **2.3. Определение перемещаемого объема навозной массы на активном участке струи при работе миксера**

Важным параметром, характеризующим эффективность эксплуатации миксера, является объем перемещаемой лопастями мешалки навозной массы. Данный параметр характеризуется в исследованиях [21–24] длиной струи, при этом авторы не учитывали радиус траектории движения частиц навозной массы.

Для определения объема перемещаемой массы активного участка струи жидкого навоза рассмотрим процесс, протекающий при вращении лопастей мешалки миксера в среде жидкого навоза.

В процессе работы миксера в среде жидкого навоза за мешалкой, при ее вращении, возникает область пониженного давления, способствующая подаче навозной массы на лопасти. Лопасти, захватывая навозную массу, перемещают ее в продольном направлении, создавая перед мешалкой область повышенного давления. Одновременно с этим навозная масса участвует и во вращательном движении. При подаче навозной массы на лопасти мешалки на некотором расстоянии от нее образовывается ядро струи жидкого навоза с постоянными осредненными скоростями.

С увеличением поперечного размера пограничного слоя толщина ядра уменьшается. Затем ядро с равномерным распределением скоростей исчезает.

Расстояние начала образования струи до момента схода с лопастей характеризуется длиной начального участка струи  $l_{сн}$ . При сходе навозной массы с лопастей мешалки образовавшаяся струя жидкого навоза перемещается в хранящуюся навозную массу (рис. 2.3).

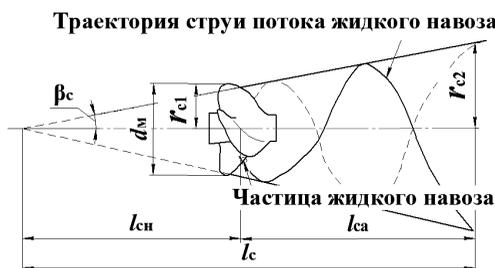


Рис. 2.3. Схема движения струи жидкого навоза:

$l_{сн}$  – длина начального участка струи;  $l_{сa}$  – длина активного участка струи;  
 $l_c$  – длина струи;  $r_{с1}$  – радиус начала активного участка струи;  $r_{с2}$  – радиус конца активного участка струи;  $d_m$  – диаметр мешалки;  $\beta_c$  – угол расширения струи

Рассматривая струю как усеченный конус, объем перемещаемой навозной массы определим по следующей формуле:

$$V_c = \frac{1}{3} \pi l_c (r_{с1}^2 + r_{с1} r_{с2} + r_{с2}^2), \quad (2.20)$$

где  $l_c$  – длина струи, м;

$r_{с1}$  – радиус начала активного участка струи, м;

$r_{с2}$  – радиус конца активного участка струи, м.

Радиус начала активного участка струи жидкого навоза можно выразить из формулы определения площади вершины струи, при этом необходимо учесть сужение струи жидкого навоза под действием лопастей мешалки. Тогда площадь струи  $F_c$  жидкого навоза определим по формуле [21, 25]:

$$F_c = 0,8\pi r_o^2, \quad (2.21)$$

где 0,8 – коэффициент, который учитывает сужение струи под действием лопастей мешалки;

$r_o$  – радиус окружности, описываемой крайней точкой лопасти, м.

Учитывая, что окружность, описываемая крайней точкой лопасти, равна диаметру мешалки, радиус начала активного участка струи  $r_{c1}$  можно выразить из равенства

$$\pi r_{c1}^2 = 0,8\pi r_M^2. \quad (2.22)$$

где  $r_M$  – радиус мешалки, м.

Тогда радиус начала активного участка струи жидкого навоза определим по формуле

$$r_{c1} = 0,89r_M. \quad (2.23)$$

Подставив в выражение (2.23) уравнение (2.10), можно определить радиус начала активного участка струи жидкого навоза:

$$r_{c1} = 0,89 \left[ \left( r_0 + \frac{f(fg - r_0\omega_M^2) - \sqrt{f^2 + 1}(fg + r_0\omega_M^2)}{2\omega_M^2\sqrt{f^2 + 1}} \right) e^{-\left(f\omega_M + \omega_M\sqrt{f^2 + 1}\right)} - \frac{\left(f + \sqrt{f^2 + 1}\right) \cdot (fg - r_0\omega_M^2)}{2\omega_M^2\sqrt{f^2 + 1}} e^{-\left(f\omega_M - \omega_M\sqrt{f^2 + 1}\right)} + \frac{fg}{\omega_M^2} \right]. \quad (2.24)$$

Длину начального участка струи  $l_{\text{сн}}$  и ее общую длину  $l_{\text{с}}$  до момента, когда осевая скорость потока жидкого навоза стремится к нулю, можно определить из формулы [22]:

$$l_{\text{сн}} = \frac{0,29}{a_{\text{с}}} r_{\text{с1}}, \quad (2.25)$$

$$l_{\text{с}} = \frac{0,96}{a_{\text{с}}} r_{\text{с1}}, \quad (2.26)$$

где  $a_{\text{с}}$  – коэффициент, характеризующий влияние турбулентности струи ( $a_{\text{с}} \approx 0,07 - 0,08$ ) [23, 24].

Подставив полученное выражение (2.23) в формулы (2.25) и (2.26), определим длину начального участка струи  $l_{\text{сн}}$  и ее общую длину  $l_{\text{с}}$ :

$$l_{\text{сн}} = \frac{0,26}{a_{\text{с}}} r_{\text{м}}, \quad (2.27)$$

$$l_{\text{с}} = \frac{0,85}{a_{\text{с}}} r_{\text{м}}. \quad (2.28)$$

На схеме движения струи жидкого навоза (рис. 2.3) видно, что длину активного участка струи можно определить по формуле

$$l_{\text{са}} = l_{\text{с}} - l_{\text{сн}}. \quad (2.29)$$

Тогда, подставив выражения (2.27) и (2.28) в формулу (2.29), определим длину активного участка струи жидкого навоза:

$$l_{\text{са}} = \frac{0,59}{a_{\text{с}}} r_{\text{м}}. \quad (2.30)$$

Подставим в формулу (2.30) уравнение (2.10) и определим длину активного участка струи жидкого навоза

$$l_{ca} = \frac{0,59}{a_c} \left[ \left[ r_0 + \frac{f(fg - r_0 \omega_M^2) - \sqrt{f^2 + 1}(fg + r_0 \omega_M^2)}{2\omega_M^2 \sqrt{f^2 + 1}} \right] e^{-\left(f\omega_M + \omega_M \sqrt{f^2 + 1}\right)} - \frac{\left(f + \sqrt{f^2 + 1}\right) \cdot (fg - r_0 \omega_M^2)}{2\omega_M^2 \sqrt{f^2 + 1}} e^{-\left(f\omega_M - \omega_M \sqrt{f^2 + 1}\right)} + \frac{fg}{\omega_M^2} \right]. \quad (2.31)$$

Из формулы (2.31) следует, что длина активного участка струи жидкого навоза зависит от физико-механических свойств жидкого навоза и угловой скорости мешалки миксера.

При удалении от вершины образования струи диаметр ее основания расширяется на угол  $\beta_c$ . Расширение струи жидкого навоза зависит от структуры и интенсивности турбулентности на сходе навозной массы с лопастей мешалки. Из данных рис. 2.3 видно, что угол расширения струи жидкого навоза  $\beta_c$  можно определить по формуле

$$tg\beta_c = \frac{r_{c2}}{l_c}, \quad (2.32)$$

где  $r_{c2}$  – радиус конца активного участка струи, м.

Подставив выражение (2.28) в формулу (2.32), определим радиус конца активного участка струи:

$$r_{c2} = \frac{0,85}{a_c} r_m tg\beta_c. \quad (2.33)$$

Подставив полученные выражения (2.23), (2.28) и (2.33) в начальную формулу (2.20), можно определить объем струи жидкого навоза:

$$V_c = 0,28\pi \frac{r_M^3}{a_c} \left[ 0,79 + \frac{tg\beta_c}{a_c} \left( 0,75 + \frac{0,72}{a_c} tg\beta_c \right) \right]. \quad (2.34)$$

Таким образом, из уравнений (2.24) и (2.31) видно, что диаметр вершины и длина активного участка струи жидкого навоза зависят от физико-механических свойств навозной массы, частоты вращения мешалки и ее геометрических размеров. Зная длину активного участка струи, можно более рационально использовать миксер, перемещая его в рабочую зону струи для разрушения более плотных слоев навозной массы.

В результате расчета (при  $r_0 = 130$  мм,  $f = 0,8$ ,  $\omega_m = 36,63$  и  $a_c = 0,07$ ) по полученным выражениям (2.24) и (2.31) установлена длина активного участка струи жидкого навоза ( $l_{ca} = 2,28$  м).

Из выражения (2.34) видно, что объем струи жидкого навоза пропорционален геометрическому размеру мешалки миксера и будет возрастать с ее увеличением.

## 2.4. Определение угла подъема лопасти мешалки

Эффективность работы лопастей мешалки определяется траекторией движения перемещаемой массы по ее поверхности с момента захвата до момента срыва. На этот параметр сильное воздействие оказывает угол подъема лопасти мешалки.

При определении угла подъема лопасти мешалки процесс перемещения массы лопастью можно рассматривать как воздействие винтовой поверхности на перемещаемые частицы. В качестве транспортирующей поверхности лопасти принимается прямая винтовая поверхность с постоянным шагом, применяемая как для транспортирования материала, так и для его диспергирования (рис. 2.4).

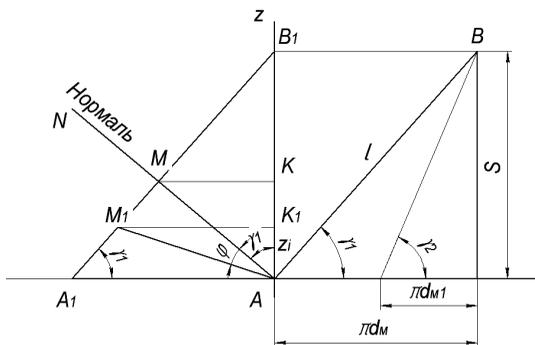


Рис. 2.4. Схема для определения угла подъема винтовой линии лопасти мешалки

В этом случае винтовая поверхность образует след движения линии, вращающейся около оси  $Z$  и перемещающейся вдоль нее по закону движения частицы массы относительно данной оси, описываемой уравнением:

$$Z = \frac{S}{2\pi} \omega_m t, \quad (2.35)$$

где  $S$  – шаг установки лопастей мешалки, м.

Приращение аппликаты  $Z$  пропорционально углу поворота образующей винтовой поверхности  $\omega_m t$  и шагу установки лопастей мешалки  $S$ .

Если образующая, перпендикулярная к оси  $Z$ , перемещается поступательно и вращательно с постоянной скоростью, то получается прямая винтовая поверхность с постоянным шагом. Вращение такой винтовой поверхности можно изобразить на плоскости перемещением прямоугольного треугольника в направлении, перпендикулярном к оси  $Z$ . Развертка наружной винтовой линии на плоскость представляет прямую  $AB$ , которая является гипотенузой треугольника с углом наклона  $\gamma_1$  к образующей.

С изменением диаметра  $d_m$  до  $d_{m1}$  угол наклона развертки винтовых линий увеличивается от его наименьшего значения  $\gamma_1$  на наружной кромке поверхности до наибольшего  $\gamma_2$  на внутренней кромке поверхности, охватывающей вал мешалки.

Винтовая поверхность, перемещая частицу, воздействует на нее так, что давление в каждой точке направлено по нормали к винтовой поверхности. Углы, образуемые нормалью и касательной в произвольно выбранной точке и винтовой поверхности с осями координат, определяют величинами их косинусов.

Косинусы угла, который образует касательная к винтовой поверхности в данной точке, соответственно, с осями  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , определяются зависимостями:

$$\begin{cases} \cos(S, X) = \cos \gamma_1 \sin \omega_m t, \\ \cos(S, Y) = \cos \gamma_1 \cos \omega_m t, \\ \cos(S, Z) = \sin \gamma_1. \end{cases} \quad (2.36)$$

Косинусы угла, который образует нормаль к винтовой поверхности, соответственно, с осями  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , определяются зависимостями:

$$\begin{cases} \cos(N, X) = \sin \gamma_1 \sin \omega_m t, \\ \cos(N, Y) = -\sin \gamma_1 \cos \omega_m t, \\ \cos(N, Z) = -\cos \gamma_1, \end{cases} \quad (2.37)$$

где  $\omega_m t$  – угол поворота образующей винтовой поверхности, град.

Угол, образуемый нормалью с осью  $Z$ , определяет транспортирующую способность винтовой поверхности. Чем меньше этот угол, тем больше направление давлений винтовой поверхности на частицу материала, что совпадает с направлением оси  $Z$ , вдоль которой перемещается частица.

Из уравнения (2.37) следует, что значение этого угла зависит только от угла подъема винтовой линии  $\gamma_1$ , следовательно, от радиуса образующей, и не зависит от угла поворота образующей винтовой поверхности  $\omega_m t$ .

Таким образом, нормаль к винтовой поверхности образует вдоль винтовой линии, взятой на этой поверхности, постоянный угол с осью  $Z$ , равный углу подъема винтовой линии  $\gamma_1$ . Сила трения, возникающая вследствие проскальзывания частиц перемещаемого материала по винтовой поверхности, отклоняет направление давления от направления нормали на угол трения

$$\varphi = \arcsin f,$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения перемещаемого материала о винтовую поверхность.

Отклонение траектории частицы навоза происходит в сторону, противоположную направлению скорости движения частицы навоза относительно винтовой поверхности.

За один оборот винтовой поверхности около оси  $Z$  частица материала  $M$  перемещается (без учета сил трения) на расстояние  $AM$ , в направлении оси  $Z$  – на расстояние  $AK$  (рис. 2.5). С учетом силы трения жидкого навоза частица перемещается на расстояние  $AM_1$ , вдоль оси  $Z$  – на расстояние  $AK_1$ .

Определим путь перемещения частицы  $M$  в направлении оси  $Z$  за один оборот с учетом сил трения. Из схемы (рис. 2.4) следует:

$$AK_1 = AM_1 \cos(\gamma_1 + \varphi),$$

$$AM_1 = S \frac{\cos \gamma_1}{\cos \varphi},$$

тогда

$$AK_1 = S \frac{\cos \gamma_1}{\cos \varphi} \cos(\gamma_1 + \varphi). \quad (2.38)$$

Заменяв  $AK_1$  через  $Z_i$  и  $\sin \varphi$  через  $f$ , равенство (2.38) для определения величины перемещения частиц в направлении перемещения окончательно запишем:

$$Z_i = S(\cos^2 \gamma_1 - f \sin \gamma_1 \cos \gamma_1) \quad \text{или} \quad Z_i = S(\cos^2 \gamma_1 - 0,5f \sin 2\gamma_1). \quad (2.39)$$

Как видно из уравнения (2.39), перемещение частиц вдоль оси винтовой поверхности зависит от шага  $S$  и угла подъема винтовой линии лопасти  $\gamma_1$ , коэффициента трения  $f$ . При постоянных  $S$  и  $f$  перемещение  $Z_i$  зависит только от угла подъема винтовой линии, на которой находится рассматриваемая частица. Причем величина  $Z_i$  возрастает с увеличением радиуса винтовой поверхности.

Согласно уравнению (2.39) осевое перемещение  $Z_i$  принимает нулевое значение (винтовая поверхность теряет транспортирующую способность) в трех случаях:

- 1) при шаге установки лопастей мешалки  $S = 0$ ;
- 2) при угле подъема винтовой линии  $\gamma_1 = 90^\circ$ ;
- 3) при коэффициенте трения  $f = \cos \gamma_1$ .

Первые два случая практически не применимы, так как для винтовой поверхности должно быть  $S > 0$  и  $0 < \gamma_1 < 90^\circ$ .

Для третьего случая в соответствии со схемой (рис. 2.4) можно записать:

$$\cos \gamma_1 = \sin(90^\circ - \gamma_1) = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma_1}. \quad (2.40)$$

Так как при  $Z_i = 0$ ,  $f = \cos \gamma_1$ , равенство (2.40) дает возможность получить параметр винтовой поверхности, при которых она не может перемещать материал вдоль винтовой осевой линии.

Угол подъема лопасти мешалки можно определить из выражения [26, 28]:

$$\sin \gamma_1 = \frac{l}{S\tau_{\text{cp}}}, \quad (2.41)$$

где  $l$  – осевая длина лопасти, м;

$\tau_{\text{cp}}$  – коэффициент лопастной решетки мешалки на среднем диаметре;

$S$  – шаг установки лопастей, м.

Шаг  $S$  установки лопастей определяется по формуле [26, 27]:

$$S = \frac{\pi d_m}{n}, \quad (2.42)$$

где  $d_m$  – диаметр мешалки, м;

$n$  – число лопастей мешалки, шт.

Преобразуем формулу (2.41), подставив в нее выражение (2.42):

$$\sin \gamma_1 = \frac{ln}{\pi d_m \tau_{\text{cp}}}. \quad (2.43)$$

После подстановки составляющих уравнение (2.40) примет вид:

$$\gamma_1 = \arccos \sqrt{1 - \left( \frac{ln}{\pi d_m \tau_{\text{cp}}} \right)^2}. \quad (2.44)$$

Таким образом, из уравнения (2.44) видно, что угол подъема винтовой линии  $\gamma_1$  на наружной кромке лопасти зависит от количества установленных лопастей и геометрических размеров мешалки.

Формула для определения угла подъема винтовой линии лопасти мешалки получена с учетом угла трения жидкого навоза, что позволило определить угол, при котором лопасть в процессе работы способна к самоочистке.

В результате расчета (при  $d_m = 542$  мм,  $n = 2$  лопасти,  $l = 271$  мм и  $\tau_{cp} = 0,6$ ) по полученному выражению (2.44) установлено, что рациональное значение угла подъема винтовой линии лопасти мешалки миксера, работающей в среде жидкого навоза, равно  $32^\circ$ .

## 2.5. Определение производительности миксера для навоза

Миксер (рис. 2.5), применяемый для диспергирования жидкого навоза, состоит из электропривода и вала, на котором закреплена лопастная мешалка. При длительном хранении навоз расслаивается, и образуются слои. Чтобы их перемешать, миксер в процессе работы поворачивают относительно вертикальной плоскости. Для диспергирования легких включений из соломы, сена и опилок, которые всплывают вверх, мешалку миксера поднимают, а для диспергирования осадка на дне мешалку миксера опускают.

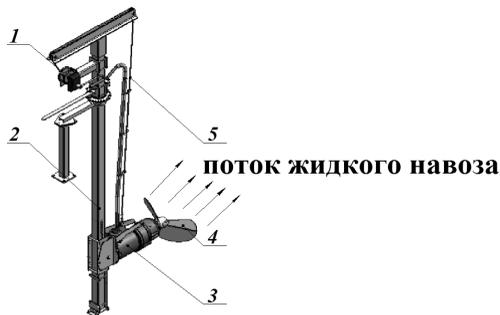


Рис. 2.5. Миксер для диспергирования жидкого навоза:  
1 – лебедка; 2 – стойка; 3 – миксер; 4 – мешалка; 5 – трос

В процессе диспергирования жидкого навоза в навозохранилище миксером с лопастной мешалкой образуется турбулентный режим. При этом значение центробежного критерия Рейнольдса можно определить по формуле [28, 29]:

$$Re_{ц} = \frac{\omega_m d_m^2}{\mu}, \quad (2.45)$$

где  $\mu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкого навоза,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Турбулентный режим в процессе диспергирования жидкого навоза характеризуется двумя одновременно протекающими процессами:

- переносом крупных частиц жидкого навоза с потоком, создаваемым мешалкой;
- пульсационными движениями жидкого навоза.

Пульсационные движения и их интенсивность непосредственно связаны с движением потока диспергируемого жидкого навоза.

Формирование скоростей в жидком навозе определяется следующими факторами:

- внешними движущими силами, приложенными к навозу;
- гидродинамическим сопротивлением на неподвижных поверхностях, ограничивающим поток, уравновешивающий эти силы;
- обменом энергии между соседними слоями жидкости [30–33].

Так как навоз к мешалке подается со всех сторон, т. е. по полусфере с площадью  $2\pi r^2$ , то скорость движения жидкого навоза на расстоянии  $l_n$  от мешалки определим по формуле [31, 34]:

$$u_n = \frac{Q_c}{2\pi l_n^2}, \quad (2.46)$$

где  $Q_c$  – секундная производительность миксера,  $\text{м}^3/\text{с}$ , определяется по формуле [35]:

$$Q_c = v S_m, \quad (2.47)$$

где  $v$  – осевая скорость движения жидкого навоза,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$S_m$  – рабочая площадь мешалки при подаче массы жидкого навоза лопастями,  $\text{м}^2$ .

При хранении навоз расслаивается, что приводит к получению массы с разной плотностью. Так, на дне хранилища плотность навоза будет больше, чем на верхних уровнях, что будет увеличивать

нагрузку на мешалку. Поэтому при расчете секундной производительности миксера будет справедливо учесть уровень заполнения хранилища жидким навозом и высоту расположения миксера в процессе работы.

Коэффициент заполнения хранилища определим по формуле

$$k = \frac{h_M}{H}, \quad (2.48)$$

где  $h_M$  – высота расположения мешалки в навозохранилище, м;  
 $H$  – уровень жидкого навоза в навозохранилище, м.

Секундную производительность с учетом коэффициента заполнения хранилища определим по формуле

$$Q_c = kvS_M, \quad (2.49)$$

Масса жидкого навоза движется в продольном направлении с осевой скоростью, которая определяется по формуле

$$v = S\omega_M \cos^2 \gamma_1, \quad (2.50)$$

где  $\gamma_1$  – угол подъема винтовой линии лопасти мешалки, град;  
 $S$  – шаг установки лопастей мешалки, м.

Подставив в формулу (2.50) выражение определения шага установки лопастей мешалки (выражение (2.42)), определим осевую скорость движения жидкого навоза:

$$v = \frac{\pi d_M \omega_M}{n} \cos^2 \gamma_1. \quad (2.51)$$

Рабочая площадь мешалки зависит от геометрического размера лопастей и их количества и определяется по формуле

$$S_M = nLB \sin \gamma_1, \quad (2.52)$$

где  $L$  – длина лопасти, м;  
 $B$  – ширина лопасти, м.

Для лопастных мешалок длина лопасти равна половине диаметра мешалки:

$$L = 0,5d_m. \quad (2.53)$$

Ширина прямоугольной лопасти определяется из выражения [36–39]:

$$B_{пл} = b d_m, \quad (2.54)$$

где  $b$  – коэффициент максимальной ширины лопасти в плановой проекции.

Так как лопасть мешалки криволинейная, то ширина лопасти будет равна длине дуги сектора (рис. 2.6). Тогда ширина лопасти

$$B = \pi r_k \frac{\alpha_c}{180^\circ}, \quad (2.55)$$

где  $r_k$  – радиус кривизны лопасти, м;

$\alpha_c$  – центральный угол, град.

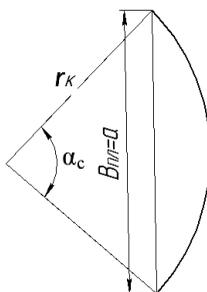


Рис. 2.6. Схема к расчету ширины лопасти:

$r_k$  – радиус кривизны лопасти;  $a$  – хорда;  $\alpha_c$  – центральный угол

Радиус кривизны лопасти

$$r_k = \frac{B_{пл}}{2 \sin \frac{\alpha_c}{2}}. \quad (2.56)$$

Тогда, подставив выражение (2.54) в формулу (2.56) и проведя преобразования, формулу (2.55) для определения ширины лопасти запишем в следующем виде:

$$B = \frac{\pi b d_m}{2 \sin \frac{\alpha_c}{2}} \frac{\alpha_c}{180^\circ}. \quad (2.57)$$

Подставив выражения (2.53) и (2.57) в формулу (2.52), определим рабочую площадь мешалки:

$$S_m = \frac{0,25\pi d_m^2 b n \sin \gamma_1}{\sin \frac{\alpha_c}{2}} \frac{\alpha_c}{180^\circ}. \quad (2.58)$$

Выражение (2.49) для определения секундной производительности миксера, подставив полученные формулы (2.51) и (2.58), запишем в следующем виде:

$$Q_c = 0,25 k b \pi^2 d_m^3 \omega_m \frac{\sin \gamma_1 \cos^2 \gamma_1}{\sin \frac{\alpha_c}{2}} \frac{\alpha_c}{180^\circ}. \quad (2.59)$$

Из формулы (2.59) видно, что производительность миксера для навоза зависит от геометрических и динамических параметров установки, таких как диаметр, угол подъема винтовой линии лопасти и частоты вращения мешалки.

В результате расчета (при  $d_m = 542$  мм,  $\omega_m = 36,63$  и  $\gamma_1 = 32^\circ$ ) по полученному выражению (2.59) установлено значение производительности миксера для навоза, равное  $1746 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

## **2.6. Определение скорости движения потока жидкого навоза под действием лопастей мешалки**

При движении навоза под действием лопастей мешалки миксера на поверхности навозной массы в хранилище в результате снижения давления в зоне захвата навоза лопастями мешалки наблюдается

образование воронки и подъем навозной массы над поверхностью в результате повышения давления в границах зоны диспергирования. При размещении работающего миксера в верхних слоях или низком уровне заполнения хранилища образование воронки может привести к частичному обнажению лопастей и, как результат, снижению его производительности.

Влияние воронки не сказывается на рабочем процессе диспергирования жидкого навоза в случае соблюдения условия, когда вершина конуса воронки располагается в зоне ступицы мешалки. Для выполнения качественного диспергирования должно соблюдаться следующее условие:

$$H \geq h_{\text{в}} + h_{\text{м}}, \quad (2.60)$$

где  $H$  – уровень жидкого навоза в навозохранилище, м;

$h_{\text{в}}$  – глубина воронки в навозохранилище, м;

$h_{\text{м}}$  – высота расположения мешалки в навозохранилище, м.

Располагая мешалку близко к дну навозохранилища, следует учитывать, что поток, создаваемый рабочей поверхностью мешалки, поднимает со дна твердые и крупные примеси, которые могут попадать в навоз при его уборке из помещений и транспортировке в навозохранилища. При этом возможны повреждения рабочего органа миксера. Минимальную высоту размещения миксера в придонной области можно определить по формуле

$$h_{\text{min}} = d_{\text{м}} + d_{\text{м}} \sin \beta_{\text{м}} = d_{\text{м}} (1 + \sin \beta_{\text{м}}), \quad (2.61)$$

где  $d_{\text{м}}$  – диаметр мешалки, м;

$\beta_{\text{м}}$  – угол наклона мешалки относительно горизонтальной плоскости, град;

$h_{\text{min}}$  – минимально допустимая высота расположения мешалки на дне навозохранилища, м.

На верхних уровнях высота размещения мешалки определится по формуле:

$$h_{\text{м}} = h_{\text{микс}} + h_{\text{min}} = h_{\text{микс}} + d_{\text{м}} (1 + \sin \beta_{\text{м}}), \quad (2.62)$$

где  $h_{\text{микс}}$  – высота поднятия миксера на стойке, м.

Глубину воронки можно определить по формуле [30]:

$$h_b = \frac{B(\psi_1) \cdot (\omega_m d_m)^2}{2g}, \quad (2.63)$$

где  $B(\psi_1)$  – коэффициент, характеризующий глубину воронки в навозохранилище (определяется по графику (рис. 2.7)) [40, 41];

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$\psi_1$  – коэффициент окружной скорости.

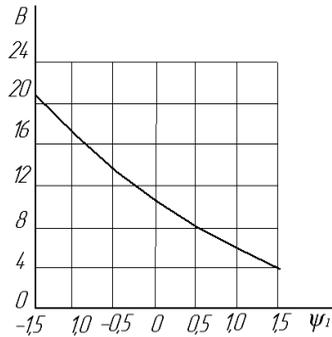


Рис. 2.7. График зависимости глубины воронки  $B$  от параметра профиля окружной скорости  $\psi_1$

Преобразуем условие (2.60), подставив в него выражение (2.63):

$$H \geq \frac{B(\psi_1) \cdot (\omega_m d_m)^2}{2g} + h_m. \quad (2.64)$$

Из полученного условия (2.64) выразим максимальное значение

$$d_m^2 = \frac{2g(H - h_m)}{B(\psi_1) \cdot \omega_m^2}. \quad (2.65)$$

Подставив формулы (2.61) и (2.62) в зависимость (2.60), получим выражения для определения уровня жидкого навоза в навозохранилище:

$$H \geq \frac{B(\psi_1) \cdot (\omega_m d_m)^2}{2g} + h_{\text{микс}} + d_m (1 + \sin \beta_m). \quad (2.66)$$

Подставив выражения (2.62) и (2.66) в формулу (2.48), для определения коэффициента заполнения хранилища получим:

$$k = \frac{h_m}{H} = \frac{2g [h_{\text{микс}} + d_m (1 + \sin \beta_m)]}{B(\psi_1) \cdot (\omega_m d_m)^2 + 2g [h_{\text{микс}} + d_m (1 + \sin \beta_m)]}. \quad (2.67)$$

Подставив выражение (2.67) в формулу (2.59), можно определить секундную производительность миксера с учетом высоты поднятия миксера в навозохранилище:

$$Q_c = \frac{b\omega_m g \pi^2 d_m^3 [h_{\text{микс}} + d_m (1 + \sin \beta_m)] \sin \gamma_1 \cos^2 \gamma_1}{\left( B(\psi_1) (\omega_m d_m)^2 + 2g [h_{\text{микс}} + d_m (1 + \sin \beta_m)] \right) \sin \frac{\alpha_c}{2}} \frac{\alpha_c}{360^\circ}. \quad (2.68)$$

Определим скорость движения жидкого навоза при ламинарном режиме диспергирования, когда мешалка вращается с небольшой частотой вращения. Для этого подставим в формулу (2.46) выражение (2.68). Тогда формула по определению скорости движения жидкого навоза примет вид:

$$u_H = \frac{b\omega_m g \pi d_m^3 [h_{\text{микс}} + d_m (1 + \sin \beta_m)] \sin \gamma_1 \cos^2 \gamma_1}{2 \left( B(\psi_1) (\omega_m d_m)^2 + 2g [h_{\text{микс}} + d_m (1 + \sin \beta_m)] \right) l_H^2 \sin \frac{\alpha_c}{2}} \frac{\alpha_c}{360^\circ}. \quad (2.69)$$

При турбулентном режиме диспергирования скорость движения жидкого навоза можно определить, учитывая его кинематическую вязкость и подставив в формулу (2.69) выражение (2.45). Тогда формула примет вид:

$$u_H = \frac{b \text{Re}_{\text{ц}} \mu g \pi d_m [h_{\text{микс}} + d_m (1 + \sin \beta_m)] \sin \gamma_1 \cos^2 \gamma_1}{2 \left( B(\psi_1) (\omega_m d_m)^2 + 2g [h_{\text{микс}} + d_m (1 + \sin \beta_m)] \right) l_H^2 \sin \frac{\alpha_c}{2}} \frac{\alpha_c}{360^\circ}. \quad (2.70)$$

Приведенные формулы (2.69) и (2.70) показывают, что скорость движения частиц жидкого навоза в навозохранилищах пропорциональна частоте вращения мешалки и ее геометрическим размерам и обратно пропорциональна квадрату расстояния пройденной частицей навоза в процессе диспергирования.

Для анализа формулы (2.70) рассмотрим график зависимости скорости движения навоза от расстояния до мешалки и высоты поднятия миксера в навозохранилище (рис. 2.8).

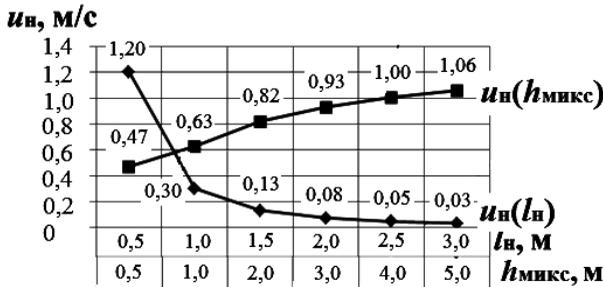


Рис. 2.8. График зависимости скорости движения навоза от расстояния до мешалки и высоты поднятия миксера в навозохранилище

Анализ графика (рис. 2.8) показал, что скорость движения навоза на удалении от мешалки постепенно затухает, при этом она пропорционально увеличивается с высотой поднятия миксера на стойке, что объясняется снижением давления в верхних слоях. Следовательно, с поднятием миксера в навозохранилище будет расти и его производительность.

## 2.7. Определение объемного расхода жидкого навоза лопастной мешалкой

В процессе диспергирования жидкого навоза в хранилищах проблемной является периферийная зона, образующаяся вблизи стенок хранилища, удаленных от мешалки. В навозохранилищах, имеющих маленькие скорости движения навозной массы, объемный расход лопасти миксера влияет на эффективность работы оборудования.

При увеличении объемного расхода навозной массы увеличивается энергоемкость процесса диспергирования жидкого навоза. Следовательно, зная величину объемного расхода, можно подобрать рациональный гидродинамический режим диспергирования более плотных слоев жидкого навоза в навозохранилище.

В вертикальных цилиндрических навозохранилищах при диспергировании навозной массы можно выделить две зоны:

- центральная для  $0 \leq l_{\text{жн}} \leq l_m$ ;
- периферийная для  $l_m \leq l_{\text{жн}} \leq D$ ,

где  $l_{\text{жн}}$  – текущее расстояние перемещения массы жидкого навоза, м;  
 $l_m$  – расстояние максимума осевой скорости, м.

При этом за счет высокой осевой скорости жидкого навоза диспергирование в каждой из зон неравномерное. Интенсивность протекания процесса диспергирования определяется скоростью турбулентной диффузии в осевом и радиальных направлениях, а также объемной подачей навозной массы между центральной и периферийной зонами (рис. 2.9).

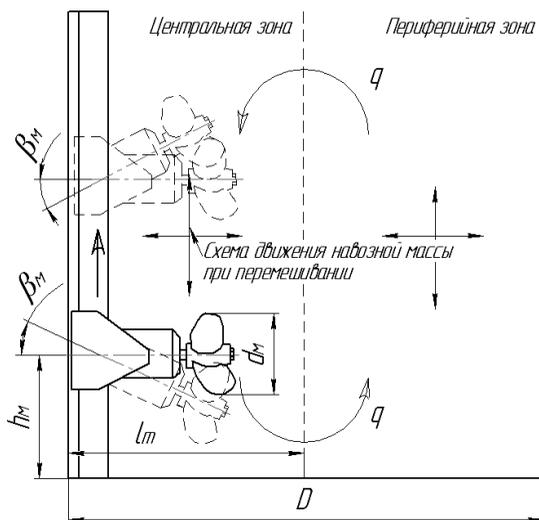


Рис. 2.9. Схема циркуляции жидкого навоза в навозохранилище:  
 $q$  – объемный расход жидкого навоза между центральной и периферийной зонами;  $D$  – диаметр навозохранилища

Объемный расход жидкого навоза между центральной и периферийной зонами навозохранилища можно определить по формуле [37, 42, 43]:

$$q = k_p \omega_m d_m^3 e^{6,9(1+\psi_1+\psi_2)}, \quad (2.71)$$

где  $k_p$  – коэффициент расхода мешалки (для лопастных мешалок принимается  $k_p = 0,0013$ ) [42];

$\psi_1$  и  $\psi_2$  – параметры профиля окружной скорости.

Подставим выражение (2.65) в формулу (2.71). Тогда объемный расход жидкого навоза между центральной и периферийной зонами навозохранилища определим по следующей формуле:

$$q = \frac{2g(H - h_m)}{B(\psi_1)\omega_m} k_p d_m e^{6,9(1+\psi_1+\psi_2)}. \quad (2.72)$$

Подставим в формулу (2.72) выражение для определения высоты размещения миксера  $h_m$ . Тогда объемный расход жидкого навоза определим по формуле

$$q = \frac{2g[H - h_{\text{микс}} - d_m(1 + \sin\beta_m)]}{B(\psi_1)\omega_m} k_p d_m e^{6,9(1+\psi_1+\psi_2)}. \quad (2.73)$$

Параметр профиля окружной скорости выражается соотношением [42]:

$$\psi_2 = -s_1 - s_2\psi_1, \quad (2.74)$$

где  $s_1$  и  $s_2$  – коэффициенты, зависящие от типа рабочего органа (для лопастных мешалок  $s_1 = 0,5$  и  $s_2 = 1,25$ ).

Тогда, выразив  $\psi_2$  через  $\psi_1$  и подставив значения коэффициентов из соотношения (2.74) в формулу (2.73), проведя преобразования, определим объемный расход жидкого навоза между центральной и периферийной зонами навозохранилища:

$$q = \frac{2g \left[ H - h_{\text{микс}} - d_{\text{м}} (1 + \sin \beta_{\text{м}}) \right]}{B(\psi_1) \omega_{\text{м}}} k_p d_{\text{м}} e^{(3,45 - 1,725 \psi_1)}. \quad (2.75)$$

Проанализировав выражение (2.75), можно сделать вывод, что объемный расход жидкого навоза между центральной и периферийной зонами навозохранилища зависит от геометрических размеров рабочего органа миксера, угла наклона его относительно горизонтальной плоскости хранилища, уровня заполнения навозохранилища навозной массой и высоты расположения миксера в диспергируемой массе.

## **2.8. Определение потребной мощности на диспергирование жидкого навоза**

При диспергировании навоза миксером затрачивается мощность как на преодоление сопротивления вращения винта в среде жидкого навоза, так и на перемещение жидкой среды лопастями мешалки. Следовательно, мощность, затрачиваемую на диспергирование навозной массы, можно определить по формуле

$$N_{\text{д}} = N_1 + N_2, \quad (2.76)$$

где  $N_1$  – мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления лопастей мешалки миксера в среде жидкого навоза, Вт;

$N_2$  – мощность, затрачиваемая на перемещение жидкой навозной массы лопастями мешалки миксера, Вт.

Мощность  $N_1$  определим в общем виде по формуле

$$N_1 = N_{\text{м}} + N_{\text{хх}}, \quad (2.77)$$

где  $N_{\text{м}}$  – потребная мощность на привод мешалки миксера, Вт;

$N_{\text{хх}}$  – мощность, затрачиваемая на холостой ход, Вт.

Потребная мощность на привод мешалки миксера в общем виде определяется по формуле [36, 41, 44]:

$$N_M = M\omega_M,$$

где  $M$  – момент сопротивления при движении рабочего органа в среде жидкого навоза, Н·м.

Формула потребной мощности на привод мешалки была бы справедлива при условии работы миксера стационарно на одном месте, что неприменимо в нашем случае, так как для разрушения донных илистых отложений и поверхностной корки миксер перемещают вверх и вниз вертикально по стойке, на которой он закреплен. При этом при перемещении вниз нагрузка на мешалку миксера будет увеличена, так как давление жидкого навоза на верхнем уровне расположения миксера меньше, чем на нижнем, потому что на работу мешалки будет влиять давление хранящейся навозной массы. Поэтому в предложенную формулу потребной мощности на привод мешалки введем поправочный коэффициент погружения миксера  $k_{\Pi}$ . За время хранения жидкого навоза уровень донного илистого осадка достигает 20 %–25 %, а поверхностной корки – 10 %–15 % общей глубины навозохранилища [52–57]. Для разрушения верхнего и нижнего слоев жидкого навоза миксер располагают в среднем слое с жидкой фракцией. Учитывая, что миксер работает в средних слоях жидкого навоза, коэффициент погружения миксера  $k_{\Pi}$  будет находиться в пределах 0,2–0,7.

Тогда формула по определению потребной мощности на привод мешалки миксера примет вид:

$$N_M = k_{\Pi} M\omega_M. \quad (2.78)$$

Момент сопротивления при движении рабочего органа в среде жидкого навоза можно определить из выражения:

$$M = Fk_{\Delta}n, \quad (2.79)$$

где  $F$  – сила, приложенная лопастями мешалки на массу жидкого навоза, Н;

$k_{\Delta}$  – расстояние от оси вращения вала до геометрического центра лопастей мешалки миксера, м.

Сила, приложенная лопастями мешалки на массу жидкого навоза, будет определяться разностью силы, затраченной на движение жидкости мешалкой  $F_{\text{дв}}$ , и силы трения жидкости о поверхности лопастей мешалки  $F_{\text{тр}}$ :

$$F = F_{\text{дв}} - F_{\text{тр}}. \quad (2.80)$$

Силу, затраченную на движение жидкости мешалкой, можно определить, с учетом геометрических параметров мешалки и физическо-механических свойств навоза, в общем виде по формуле

$$F_{\text{дв}} = m_{\text{н}} \omega_{\text{м}}^2 r_{\text{м}} + m_{\text{н}} g, \quad (2.81)$$

где  $m_{\text{н}}$  – масса навоза, захватываемая мешалкой, кг;  
 $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Силу трения частиц жидкого навоза о поверхность лопасти мешалки можно определить по формуле

$$F_{\text{тр}} = f F_{\text{дв}}, \quad (2.82)$$

где  $f$  – коэффициент трения жидкого навоза о поверхность лопасти мешалки.

Преобразуем формулу (2.80) с учетом выражений (2.81) и (2.82). Тогда силу, приложенную лопастями мешалки на массу жидкого навоза, определим из выражения:

$$F = (1 - f) (m_{\text{н}} \omega_{\text{м}}^2 r_{\text{м}} + m_{\text{н}} g). \quad (2.83)$$

Подставив полученное выражение (2.83) в формулу (2.79), определим момент сопротивления при движении рабочего органа в среде жидкого навоза:

$$M = (1 - f) (m_{\text{н}} \omega_{\text{м}}^2 r_{\text{м}} + m_{\text{н}} g) k_{\text{л}} n. \quad (2.84)$$

Преобразуем начальную формулу (2.78) для определения потребной мощности на привод мешалки, выразив  $M$  полученным выражением (2.84). Тогда потребную мощность на привод мешалки миксера  $N_{\text{м}}$  можно определить из следующего выражения:

$$N_M = (1-f)(m_H \omega_M^2 r_M + m_H g) k_{\Pi} k_{\Delta} n \omega_M. \quad (2.85)$$

Мощность, затрачиваемая на холостой ход миксера, как правило, не превышает 30 % от потребной мощности на привод мешалки  $N_M$ , поэтому принимаем  $N_{\text{хх}} = 0,3 N_M$ . Тогда уравнение (2.77) примет вид:

$$N_1 = 1,3 N_M. \quad (2.86)$$

Мощность, затрачиваемая на преодоление сопротивления лопастей мешалки миксера в среде жидкого навоза, определяется выражением:

$$N_1 = 1,3(1-f)(m_H \omega_M^2 r_M + m_H g) k_{\Pi} k_{\Delta} n \omega_M. \quad (2.87)$$

Для определения мощности  $N_2$ , затрачиваемой на перемещение жидкой навозной массы лопастями мешалки миксера, рассмотрим движение крайней точки А частицы навоза (рис. 2.10, а), находящейся в начальный момент в положении  $A_0$  по плоскости лопасти.

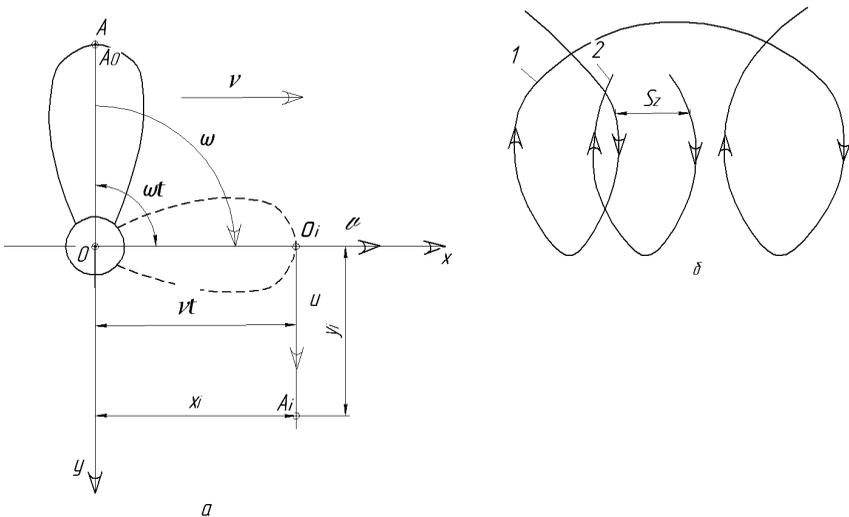


Рис. 2.10. Траектория движения частицы навоза при диспергировании мешалкой: а – схема к определению уравнений движения; б – траектория движения частицы навоза при диспергировании

Через некоторое время  $t$  частица навоза переместится в положение  $O_i$ , пройдя путь  $vt$ . При этом лопасть мешалки повернется на угол  $\omega_m t$ , где  $v$  – поступательная скорость частицы навоза, м/с. В результате точка  $A$  переместится из положения  $A_0$  в  $A_i$ , и ее координаты будут определяться уравнениями:

$$x_i = vt \pm r_m \cos(\omega_m t); y_i = r_m \sin(\omega_m t). \quad (2.88)$$

Уравнения (2.88) определяют траекторию абсолютного движения точки  $A$  в параметрической форме. Эта траектория представляет собой циклоиду.

Геометрическая форма циклоиды зависит от показателя кинематического режима

$$\lambda = \frac{u_A}{v}, \quad (2.89)$$

где  $u_A$  – окружная скорость точки  $A$ , м/с.

Приняв  $\omega_m t = \varphi$ ,  $u = \omega_m r_m$ , получим:

$$t = \frac{\varphi}{\omega_m}, \text{ или } t = \frac{\varphi r_m}{u}. \quad (2.90)$$

Подставив в уравнение (2.89) вместо  $t$  и  $\omega t$  выражения  $\varphi r_m / u$  и  $\varphi$ , заменив  $u / v$  через  $\lambda$ , получим координаты перемещения частицы навоза по лопасти, которые будут определяться уравнениями:

$$x_i = r_m \left( \frac{\varphi}{\lambda} \pm \cos \varphi \right); y_i = r_m \sin \varphi. \quad (2.91)$$

При вращении мешалки значение  $\lambda > 1$ , и траектория частицы навоза имеет форму удлинненной циклоиды (рис. 2.10, б). Так как на удалении от внешних кромок лопастей мешалки окружная скорость постепенно затухает, поступательная скорость на некотором расстоянии  $x_i$  будет расти за счет движущей (толкающей) силы, создаваемой мешалкой.

Величина подачи жидкого навоза мешалкой зависит от поступательной скорости. Чем больше поступательная скорость, тем больше и подача. На мешалке закрепляются две и более лопасти, следовательно, одноименные частицы навоза, захватываемые другими ло-

пастями, описывают одинаковые циклоиды, но смещенные вперед по ходу движения частицы навоза. Так, если частица навоза описывает траекторию 1 (рис. 2.10, б), то траектория 2 последующей частицы навоза будет смещена в горизонтальной плоскости на величину  $S_z$ , называемую подачей:

$$S_z = vt_z, \quad (2.92)$$

где  $t_z$  – время, за которое последующая лопасть мешалки в относительном движении займет положение предыдущей, т. е. повернется на угол, равный центральному углу между ними, с.

Чем больше лопастей на мешалке, тем меньше это время. Следовательно:

$$t_z = \frac{t_{об}}{n}, \quad (2.93)$$

где  $t_{об}$  – время, за которое мешалка повернется на один оборот, с.

Время одного оборота можно определить по формуле

$$t_{об} = \frac{2\pi}{\omega_m}. \quad (2.94)$$

Тогда время, за которое последующая лопасть мешалки займет положение предыдущей, определим из выражения:

$$t_z = \frac{2\pi}{\omega_m n}. \quad (2.95)$$

Подставив выражение (2.95) в формулу (2.92), получим:

$$S_z = \frac{2\pi v}{\omega_m n}. \quad (2.96)$$

Поступательная скорость частицы навоза определяется по формуле

$$v = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (2.97)$$

где  $u$  – окружная скорость, м/с;

$v$  – осевая скорость жидкого навоза, м/с.

Преобразуем формулу (2.50) для определения осевой скорости жидкого навоза, подставив в нее выражение (2.42). Подставив полученное выражение и выразив  $u = \omega_M r_M$ , преобразуем формулу (2.97):

$$v = \omega_M r_M \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 \cos^4 \gamma_1}{n^2}}. \quad (2.98)$$

Преобразуем формулу определения подачи жидкого навоза мешалкой (уравнение (2.96)), заменив  $v$  выражением (2.98). Тогда, с учетом формулы (2.98), подачу можно определить из следующего выражения:

$$S_z = \frac{2\pi r_M}{n} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 \cos^4 \gamma_1}{n^2}}, \text{ или } S_z = \frac{l_{\text{окр}}}{n} \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 \cos^4 \gamma_1}{n^2}}, \quad (2.99)$$

где  $l_{\text{окр}}$  – длина окружности, описываемой лопастью мешалки, м.

Из выражения (2.99) видно, что подача жидкого навоза мешалкой зависит от числа лопастей и геометрических размеров мешалки.

В процессе диспергирования мешалка миксера всасывает жидкий навоз в направлении оси вращения мешалки. Динамическое давление миксера для навоза составляет основную долю полного напора.

Лопасть мешалки (рис. 2.11) с радиусами  $r_1$  на входе и  $r_2$  на выходе сообщает частице навоза необходимую абсолютную скорость  $v_a$ , направленную под углом  $\beta$  к радиусу-вектору  $r$  (ОА).

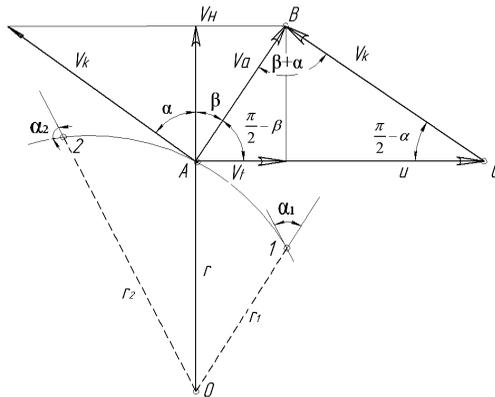


Рис. 2.11. Схема криволинейной лопасти миксера для навоза

Теоретическое давление, создаваемое мешалкой миксера, выражают уравнением Эйлера [45–49]:

$$P_T = \frac{N_2}{Q_c} = \rho(u_2 v_{t2} - u_1 v_{t1}), \quad (2.100)$$

где  $N_2$  – мощность, затрачиваемая на перемещение жидкой навозной массы лопастями мешалки миксера, Вт;

$Q_c$  – секундная производительность миксера, м<sup>3</sup>/с;

$\rho$  – плотность жидкого навоза, кг/м<sup>3</sup>;

$u_1$  и  $u_2$  – окружные скорости точек начала и конца лопасти, м/с;

$v_{t1}$  и  $v_{t2}$  – проекции абсолютной скорости частицы жидкого навоза на направления, перпендикулярные к радиусам-векторам, соединяющим ось вращения с началом и концом лопасти.

Заменим в уравнении (2.100)  $v_{t1}$  и  $v_{t2}$  на окружные скорости  $u_1$  и  $u_2$ . Для точки А:

$$v_t = u - v_k \sin \alpha = u \left( 1 - \frac{v_k}{u \sin \alpha} \right), \quad (2.101)$$

где  $\alpha$  – угол, образованный между направляющими скоростей  $v_k$  и  $v_n$ , град;

$v_k$  – скорость, направленная по касательной к точке А, м/с.

Из треугольника ABC  $\frac{v_k}{u} = \frac{\cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)}$  Тогда, подставив значения

в выражение (2.101), получим:

$$v_t = u \left( 1 - \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right), \text{ или } v_t = u \frac{\sin \beta \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}. \quad (2.102)$$

Для точек 1 и 2, соответственно, начала и конца лопасти определим  $v_{t1}$  и  $v_{t2}$ :

$$v_{t1} = u_1 \frac{\sin \beta_1 \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} \text{ и } v_{t2} = u_2 \frac{\sin \beta_2 \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)}. \quad (2.103)$$

Подставим полученные выражения в уравнения Эйлера. Тогда теоретическое давление определим из выражения:

$$P_T = \rho u_2^2 \left[ \frac{\sin \beta_2 \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} - \frac{u_1^2}{u_2^2} \frac{\sin \beta_1 \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} \right]. \quad (2.104)$$

Заменим  $u_1$  на  $\omega r_1$  и  $u_2$  на  $\omega r_2$ . Тогда выражение (2.104) примет вид:

$$P_T = \rho \omega_m^2 r_2^2 \left[ \frac{\sin \beta_2 \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} - \frac{r_1^2}{r_2^2} \frac{\sin \beta_1 \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} \right]. \quad (2.105)$$

Из условия неразрывности потока жидкого навоза [16]:

$$Q_c = k v S_M = \frac{0,25 \pi k d_m^2 b n v_{H2} \sin \gamma_1}{\sin \frac{\alpha_c}{2}} \frac{\alpha_c}{180^\circ}. \quad (2.106)$$

Заменим  $v_{H2}$  выражением:

$$v_{H2} = \frac{v_{T2}}{tg \beta_2} = \omega_m r_2 \frac{\cos \alpha_2 \cos \beta_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)}. \quad (2.107)$$

Радиус лопасти на выходе  $r_2$  равен радиусу мешалки  $r_m$ . Тогда, выразив диаметр мешалки  $d_m$  через радиус  $r_m$  и заменив  $v_{H2}$  полученным выражением (2.107), из условия неразрывности потока в точке 2, можно преобразовать формулу (2.106):

$$Q_c = \frac{k b \pi r_m^3 \omega_m n \sin \gamma_1}{\sin \frac{\alpha_c}{2}} \frac{\alpha_c}{180^\circ} \frac{\cos \alpha_2 \cos \beta_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)}. \quad (2.108)$$

Подставив выражение (2.108) и (2.105) в формулу (2.100), определим затраты мощности на перемещение массы жидкого навоза миксером:

$$N_2 = P_T Q_c = \frac{k b \pi r_m^3 \omega_m^3 n \sin \gamma_1}{\sin \frac{\alpha_c}{2}} \frac{\alpha_c}{180^\circ} \frac{\cos \alpha_2 \cos \beta_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} \left[ \frac{\sin \beta_2 \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} - \frac{r_1^2}{r_m^2} \frac{\sin \beta_1 \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \beta_1)} \right]. \quad (2.109)$$

В результате расчета (при  $d_m = 542$  мм,  $\omega_m = 36,63$  и  $\gamma_1 = 32^\circ$ ) по полученному выражению (2.109) установлено значение затрат мощности на перемещение массы жидкого навоза миксером, равное 1381 Вт.

Подставив полученные выражения (2.109) и (2.87) в начальную формулу (2.76), можно определить потребную мощность, затрачиваемую на диспергирование навозной массы:

$$N_d = 1,3(1-f) \left( m_{\text{н}} \omega_m^2 r_m + m_{\text{н}} g \right) k_{\text{н}} k_{\text{д}} n \omega_m + \frac{k b \rho \pi r_m^5 \omega_m^3 n \sin \gamma_1}{\sin \frac{\alpha_c}{2}} \frac{\alpha_c}{180^\circ} \frac{\cos \alpha_2 \cos \beta_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} \times \left[ \frac{\sin \beta_2 \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} - \frac{r_1^2 \sin \beta_1 \cos \alpha_1}{r_m^2 \sin(\alpha_1 + \beta_1)} \right]. \quad (2.110)$$

Получено уравнение, позволяющее определить потребную мощность на диспергирование жидкого навоза с учетом его физико-механических свойств, геометрических параметров лопастей мешалки миксера и геометрической формы циклоиды навозного потока.

## 2.9. Выводы по главе 2

1. В процессе диспергирования жидкого навоза мешалка увлекает за собой в движение его компоненты, создавая вращающийся поток, а вследствие разности скорости струи потока навоза и диспергируемой среды происходит процесс диспергирования в навозохранилищах. При этом за кромками мешалки давление быстро уменьшается вследствие затухания окружной скорости потока жидкого навоза и его избыточного давления, что уменьшает диаметр струи потока в начале активного участка и увеличивает по мере внедрения потока жидкого навоза в хранящуюся навозную массу.

Из формулы (2.31) видно, что при определении длины активного участка струи потока жидкого навоза необходимо учитывать динамический характер процессов, происходящих при диспергировании различных сред в рабочей зоне мешалки, физико-механические свойства этих сред и параметры мешалки.

Так, при увеличении угловой скорости мешалки длина активного участка струи потока жидкого навоза также увеличивается. В результате расчета по полученному выражению (2.31) установлена длина активного участка струи потока жидкого навоза. Длина активного участка струи потока равна 2,242 м.

Анализ формулы (2.34) показывает, что объем струи жидкого навоза пропорционален геометрическому размеру мешалки миксера и будет возрастать с ее увеличением.

2. Одним из основных параметров, обеспечивающих качественное диспергирование жидкого навоза в хранилище, является геометрический размер мешалки. Конструкция мешалки должна осуществлять разрушение слежавшегося слоя осадка и перемешивание жидкого навоза до однородного состояния с минимальными затратами энергии.

Теоретическими исследованиями получено уравнение (2.11), позволяющее определить рациональный диаметр мешалки миксера для навоза. Из анализа формулы (2.11) видно, что при увеличении диаметра мешалки увеличивается и длина лопасти, следовательно, и площадь ее рабочей поверхности, что необходимо для оборудования с малым числом оборотов вала мешалки, так как при увеличении площади рабочей поверхности будет увеличиваться и гидравлическое давление струи потока жидкого навоза, следовательно, и расстояние, на которое переместится этот поток. Также при определении диаметра мешалки необходимо учитывать динамический характер процессов, происходящих при диспергировании различных сред в рабочей зоне мешалки, физико-механические свойства этих сред и параметры мешалки.

В результате расчета по полученному выражению (2.11) установлено рациональное значение диаметра мешалки миксера для навоза, применяемого в закрытых цилиндрических навозохранилищах. Диаметр мешалки равен 542 мм.

3. При диспергировании любой жидкой среды, в частности жидкого навоза, лопастными мешалками важным фактором является угол подъема лопасти, так как в случае малого угла подъема лопасти будет малая величина упора лопасти, следовательно, давления и скорости струи потока жидкого навоза, создаваемого мешалкой, а при больших углах подъема лопасти мешалки происходит резкое схождение жидкого навоза с кромок лопасти, что приводит к образованию турбулентного движения со стороны всасывания мешалки, следовательно, к увеличению затрат энергии на процесс диспергирования жидкого навоза.

Как видно из уравнения (2.41), перемещение частиц вдоль оси винтовой поверхности зависит от шага установки лопастей, угла подъема винтовой линии и коэффициента трения материала. Осевое перемещение принимает нулевое значение (винтовая поверхность теряет транспортирующую способность) в трех случаях:

- 1) при шаге установки лопастей  $S = 0$ ;
- 2) при угле подъема винтовой линии  $\gamma_1 = 90^\circ$ ;
- 3) при коэффициенте трения  $f = \cos \gamma_1$ .

Первые два случая практически не применимы, так как для винтовой поверхности должно быть  $S > 0$  и  $0 < \gamma_1 < 90^\circ$ .

Формула для определения угла подъема винтовой линии лопасти мешалки получена с учетом угла трения жидкого навоза, что позволило определить угол, при котором лопасть в процессе работы способна к самоочистке.

Таким образом, из уравнения (2.44) видно, что угол подъема винтовой линии  $\gamma_1$  на наружной кромке лопасти зависит от физико-механических свойств, реологических параметров перемешиваемой среды и геометрических размеров мешалки. Угол подъема винтовой линии лопасти мешалки миксера, работающего в среде жидкого навоза, равен  $32^\circ$ .

4. Качественное диспергирование жидкого навоза имеет место при условии, когда высота заполнения хранилища жидким навозом будет больше высоты расположения лопастей мешалки миксера, что сможет препятствовать образованию воронки вследствие вращения мешалки и образованию в ее центре зоны пониженного давления, сопровождающейся подъемом массы навоза у границ зоны диспергирования. Влияние воронки не сказывается на рабочем процессе диспергирования жидкого навоза в случае соблюдения условия, когда вершина воронки располагается выше ступицы мешалки.

Полученные формулы (2.69) и (2.70) показывают, что скорость движения частиц жидкого навоза в навозохранилищах пропорциональна частоте вращения мешалки и ее геометрическим размерам и обратно пропорциональна квадрату расстояния, пройденного частицей навоза в процессе диспергирования, и зависит от физико-механических свойств диспергируемой среды.

Зная скорость движения навоза на отдельном участке, можно определить активную зону диспергирования.

Анализируя формулу (2.75), видим, что объемный расход жидкого навоза между центральной и периферийной зонами навозохранилища зависит от геометрических размеров рабочего органа миксера, угла наклона его относительно горизонтальной плоскости хранилища, уровня заполнения навозохранилища навозной массой и высоты поднятия миксера на стойке. С увеличением диаметра навозохранилища снижается значение объемного расхода жидкого навоза при диспергировании, что ведет к увеличению мощностей на привод мешалки или установке дополнительного оборудования для диспергирования навозной массы.

Зная величину объемного расхода, можно подобрать рациональный гидродинамический режим диспергирования более плотных слоев жидкого навоза в навозохранилище.

5. Величина подачи жидкого навоза мешалкой прямо пропорциональна поступательной скорости. На мешалке закрепляются две лопасти и более, следовательно, одноименные частицы навоза, захватываемые другими лопастями, описывают одинаковые циклоиды, но смещенные вперед по ходу движения частицы навоза. Из формулы (2.96) следует, что подачу на лопасть можно изменить, если изменить число лопастей на мешалке или показатель кинематического режима (поступательную скорость, частоту вращения мешалки).

В результате расчета по полученному выражению (2.99) установлено, что величина подачи жидкого навоза мешалкой, при ее геометрическом размере, равном 542 мм, составляет 2,1 м. Таким образом, в результате проведенного расчета можно сделать вывод, что в цилиндрических навозохранилищах диаметром более 10 м целесообразно устанавливать более одного миксера.

Из выражения (2.105) видно, что теоретическое давление, создаваемое мешалкой миксера, растет пропорционально квадрату диаметра и частоты вращения мешалки и зависит от физико-механических свойств навоза, геометрических параметров мешалки и частоты ее вращения.

Как свидетельствует формула (2.108), производительность пропорциональна частоте вращения мешалки, геометрическим параметрам и углу подъема винтовой линии лопастей.

Получено уравнение, позволяющее определить потребную мощность на диспергирование жидкого навоза с учетом его физи-

ко-механических свойств, геометрических параметров лопастей мешалки миксера и геометрической формы циклоиды навозного потока.

Из формулы (2.109) следует, что затраты мощности на перемещение массы жидкого навоза миксером пропорциональны кубу частоты вращения мешалки.

## **ГЛАВА 3**

### **МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

#### **3.1. Программа экспериментальных исследований**

Диспергирование навоза в навозохранилищах является важным технологическим процессом, так как существенно влияет на качество навоза, который в дальнейшем перерабатывается или вносится на поля.

Для проверки основных теоретических исследований и положений по определению рациональных параметров конструкции мешалки миксера для навоза с целью получения однородной смеси жидкого навоза и снижения энерго- и металлоемкости процесса, необходимо провести экспериментальные исследования.

Программой экспериментальных исследований предусматривается:

1. Разработать и изготовить экспериментальную установку.
2. Провести многофакторный эксперимент и анализ результатов исследований.
3. Обосновать рациональные параметры рабочего органа миксера и режимы его работы.

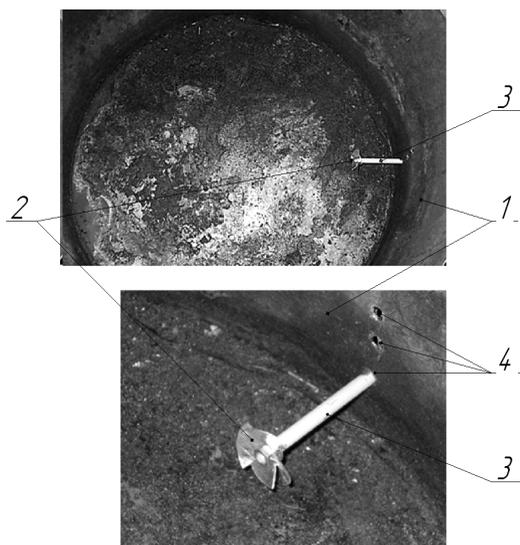
Методика проведения эксперимента составлялась в соответствии с общепринятыми принципами исследований по механизации сельского хозяйства [50–53]. Обработка результатов экспериментальных исследований осуществлялась методами математической статистики и применением информационных технологий.

#### **3.2. Экспериментальная установка для проведения исследований**

Для определения влияния параметров мешалки миксера и его режимов работы на образование однородной смеси жидкого навоза с минимальными затратами энергии, а также для подтверждения

правильности теоретических исследований проведены экспериментальные исследования миксера для навоза.

Экспериментальные исследования выполняются на специально изготовленной установке (рис. 3.1). Экспериментальная установка, выполненная в соотношении 1:10, с применяемыми в хозяйствах навозохранилищами и миксером, состоит из емкости 1, мешалки 2, закрепленной на валу 3, для регулирования высоты подъема мешалки 2 выполнены окна 4.



*Рис. 3.1.* Экспериментальная установка:  
1 – емкость; 2 – мешалка; 3 – вал; 4 – регулировочные окна

Экспериментальная установка работает следующим образом. Емкость заполняется навозной массой, и затем включается привод вала мешалки. Закрепленная на конце вала мешалка совершает вращательное движение.

При вращении лопасти мешалки захватывают навозную массу и перемещают ее в радиальных направлениях. При этом часть массы перемещается линейно, за счет созданного мешалкой потока жидкости. В результате разности скоростей радиально направленного и линейно направленного потоков жидкости образуется перепад

давления в смешиваемой массе, следствием чего является образование вихревых потоков, которые под действием радиально направленной силы инерции внедряются в илстые включения исследуемой массы жидкого навоза, тем самым разрушая ее структуру.

Проведенный анализ конструкции существующих миксеров для навоза и поисковые исследования показали, что для достижения требуемой однородности при диспергировании жидкого навоза в качестве рабочих органов эффективно использовать лопастную мешалку. По сравнению с другими видами перемешивающих устройств миксер с лопастной мешалкой более активно воздействует на жидкий навоз, разрушая при этом комки слежавшейся массы навоза. Жидкий навоз движется импульсивно, отдельными последовательными порциями. Это происходит за счет сдвига навоза соседними, при вращении, лопастями мешалки на расстояние, равное шагу лопастей. Однако неизвестными параметрами мешалок при диспергировании жидкого навоза являются диаметр мешалки, угол подъема винтовой линии лопастей и число оборотов вала мешалки миксера для навоза.

Для проведения исследований были изготовлены также образцы мешалок с различным количеством и углом подъема винтовой линии лопастей (рис. 3.2).

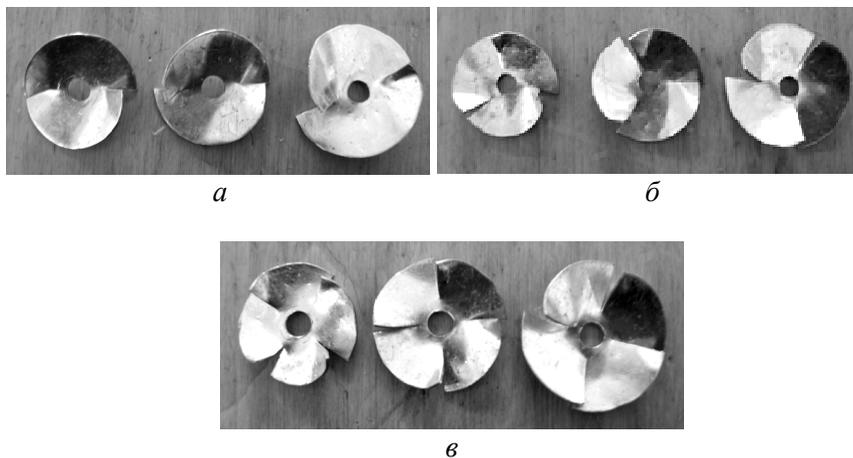


Рис. 3.2. Образцы мешалок для экспериментальной установки:  
*а* – 2-лопастная мешалка; *б* – 3-лопастная мешалка; *в* – 4-лопастная мешалка

Таким образом, описанная экспериментальная установка позволяет проводить исследования по изучению процесса диспергирования жидкого навоза в закрытых навозохранилищах, включающие частицы соломы и илистые отложения, и определить необходимый диаметр, угол подъема винтовой линии лопастей и число оборотов вала мешалки миксера для навоза.

При проведении исследований на экспериментальной установке было выявлено, что 2 и 3-лопастные мешалки более активно воздействуют на массу жидкого навоза. Это связано с тем, что площадь рабочей поверхности указанных мешалок больше и при небольшом числе оборотов вала (до 500 мин<sup>-1</sup>) давление струи потока жидкого навоза больше, чем у миксера с 4-лопастной мешалкой. При увеличении числа оборотов вала миксера выше 500 мин<sup>-1</sup> применение 2 и 3-лопастных мешалок приводило к вибрации вала миксера, а установка 4-лопастной мешалки в процессе диспергирования жидкого навоза снижала этот негативный эффект.

### **3.3. Выбор и использование критериев оценки однородности диспергируемой навозной массы**

Качественные критерии носят статистический характер [54]. Первый и наиболее простой способ состоит в определении дисперсии концентрации того ингредиента, который играет роль диспергируемой фазы. При этом общий объем смеси разделяют на достаточно большое число элементарных объемов и, пользуясь таблицей случайных величин, отбирают достаточно представительную выборку, которую направляют на химический анализ. Может быть установлена взаимосвязь величины дисперсии и какого-либо параметра смешения. Используют также фактор сравнительной неоднородности, представляющий собой отношение дисперсий в исследуемом и стандартном образцах.

Наиболее обоснованным при оценке однородности перемешиваемой навозной массы следует считать использование аппарата математической статистики, как для обоснования критериев, так и для решения других методических задач.

Первоначальной задачей при разработке универсальной методики оценки равномерности распределения компонентов навоза является выбор критериев оценки однородности смеси, которые с необходимой точностью могли бы характеризовать среднюю концентрацию и распределение контрольного компонента [54].

В практике исследований имеет место недостаточно обоснованное применение различных критериев, которые чаще всего представляют собой различные варианты сравнения заданной и фактической концентраций компонентов смеси. В частности, для оценки однородности смесей нашел применение коэффициент неравномерности [55], характеризующий среднее отклонение соотношения компонентов от заданного:

$$K_o = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} |C_i - C_o|}{n_i C_o} 100, \quad (3.1)$$

где  $n_i$  – число отбираемых проб, шт.;

$C_o$  и  $C_i$  – соответственно заданная и фактическая концентрации компонентов.

Применение такого показателя при оценке однородности смесей не позволяет решать все вопросы, возникающие при исследовании и испытании миксеров для навоза.

При исследовании и испытании миксеров для навоза используют показатель, называемый степенью однородности, который определяется выражениями:

$$\theta_1 = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} \frac{C_i}{C_o} \text{ при } C_i < C_o \text{ и } \theta_2 = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} \frac{2C_o - C_i}{C_o} \text{ при } C_i > C_o, \quad (3.2)$$

или объединенный показатель [56]:

$$\theta_{\text{см}} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}.$$

Введением показателя (3.2) преследовалась цель добиться равных значений его величины при одинаковых отклонениях индикатора в пробах от заданного  $C_o$  в меньшую или большую

стороны хотя бы при одном соотношении индикатора  $Y$  и наполнителя  $N$ . Действительно, при  $Y/N = 1$  и заданной концентрации  $C_0 = 0,5$  вторая часть выражения (3.2) примет вид:

$$\theta_2 = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} \frac{1 - C_i}{0,5} \quad \text{при} \quad C_i > 0,5,$$

что обеспечит одинаковые значения  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , например, при  $C_0 = 0,4$  и  $C_2 = 0,6$  соответственно.

Кроме степени однородности  $\theta$  иногда в качестве критерия используется относительная концентрация

$$C = \frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} \frac{C_i}{C_0}. \quad (3.3)$$

Вполне очевидно, что при достаточном количестве и правильном отборе проб этот показатель не может объективно характеризовать работу миксера для навоза.

Общим недостатком рассмотренных показателей является то, что они не опираются на математическую статистику, позволяющую принимать обоснованные решения в условиях неопределенности, характерных для процесса перемешивания. Вместе с тем известны попытки специально для оценки однородности перемешивания изменить некоторые общепринятые статистические характеристики экспериментальных данных. Так, при изучении процесса диспергирования жидкого навоза относительная неоднородность смеси определялась как средневзвешенная величина

$$\Theta = \frac{n_i - m_i}{n_i \cdot \bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_i - m_i} (C_i - \bar{C})^2}{n_i - m_i}} + \frac{m_i}{\varepsilon \cdot n_i \cdot \bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{m_i} (C_k - \bar{C})^2}{m_i}}, \quad (3.4)$$

где  $m_i$  – среднее арифметическое содержание контрольного компонента во всех пробах;

$\bar{C}$  – среднее арифметическое значение контрольного компонента в пробах;

$C_k$  – значение концентрации контрольного компонента в  $i$ -й пробе;

$\varepsilon$  – относительная предельная погрешность.

Между выражениями, по форме напоминающими коэффициенты вариации, первая часть показателя неоднородности (формула (3.4)) вычисляется для  $C_i < \bar{C}$ , вторая – для  $C_k > \bar{C}$ . Одновременно в выражении (3.4) выравниваются предельные значения обоих «коэффициентов вариации». Для этого в знаменатель второго слагаемого введено соотношение коэффициентов  $\varepsilon$ .

Такой показатель неоднородности диспергирования навоза, принимающий в предельных случаях значения

$$\lim_{C_i \rightarrow 0} \Theta = 1 \text{ и } \lim_{C_k \rightarrow 1} \Theta = 0,$$

позволяет также одной величиной характеризовать однородность диспергирования навоза.

Однако из анализа структуры показателя неоднородности (выражение (3.4)) видно, что в данном случае искажен смысл статистической характеристики и потеряны все преимущества, которые мог бы дать развитой аппарат математической статистики.

Еще одним искажением коэффициента вариации является подстановка в выражение для его вычисления вместо среднего значения концентрации индикатора  $\bar{C}$  заданного значения  $C_0$ :

$$V_0 = \frac{100}{C_0} \sqrt{\frac{\sum (C_i - C_0)^2}{n_i - 1}}. \quad (3.5)$$

Покажем, что, исходя из общих целей диспергирования навоза, такая подстановка недопустима, так как показатель, рассчитанный по формуле (3.5), неодинаково реагирует на изменение среднего содержания контролируемого компонента. Например, если при  $C_0 = 4$ , то в этих случаях  $V_1 = 0,71$ ,  $V_2 = 0,23$ ,  $V_3 = 0,79$ .

Наиболее вероятный случай – при качестве смеси, не соответствующей агротребованиям, объясняющийся незаконченностью процесса, когда  $C_i < \bar{C}$ . При этом значительное отклонение средней концентрации  $\bar{C}$  от оптимальной  $C_0$  не приводит к заметной реакции  $V_0$ . Вместе с тем превышение концентрации  $\bar{C}_2$  над заданной сильнее влияет на качество смеси. Надо полагать, что показатель  $V_0$  вносит разноту в оценку однородности смеси, поэтому для практических целей в большинстве случаев он непригоден.

В методике проведения испытаний машин для диспергирования массы жидкого навоза равномерность распределения расслоившихся фракций рекомендуется сравнивать по степени однородности [57].

$$\lambda_0 = 100 - \Theta, \quad (3.6)$$

где  $\Theta$  – относительная неоднородность смеси.

Многие вопросы оценки качества диспергирования решаются на строгой основе статистики. Однако в некоторых случаях необходимо вычисление коэффициента вариации, например, для оценки качества диспергирования в переходном процессе (изменяется среднее количество индикатора в пробе и, одновременно, – выборочная дисперсия). Коэффициент вариации необходим для сравнения равномерности распределения смеси разных фракций навозной массы.

Более подробно подход к оценке однородности смесей, основанный на строгой методической основе статистики, рассмотрен в трудах Ю.В. Карасева, Б.А. Комарова, Е.А. Раскатова [53, 57, 58].

Изложенное позволяет сделать вывод, что абсолютное большинство задач по оценке качества диспергируемых сред целесообразно решать с помощью таких показателей, как среднее содержание индикатора в пробах и выборочная дисперсия. Однако вычисление коэффициента вариации необходимо при оценке качества смешивания в переходном процессе и, при необходимости, сравнения равномерности распределения в смеси разных компонентов.

По экспериментальным данным может быть построена эмпирическая функция распределения. Однако в случае неиспользования априорных сведений о типе неизвестной функции распределения для достаточно надежной замены ее эмпирическим распределением требуются очень большие выборки.

Наиболее целесообразным является проведение априорного анализа изучаемой смеси с тем, чтобы установить тип неизвестной функции распределения, позволяющей определить его параметры с нужной точностью, которая обеспечивается при гораздо меньших объемах выборки [58–60].

### 3.4. Определение необходимого числа проб и минимально допустимой массы

При проведении исследований диспергирующих устройств следует очень критично относиться к количеству и размеру проб с тем, чтобы с необходимой точностью характеризовать распределение индикатора в исследуемых материалах.

Всю смесь жидкого навоза, находящуюся в хранилище, можно условно разбить на  $A$  элементарных объемов, в каждом из которых будет свое среднее значение концентрации ключевого компонента  $C_i$ . Величина элементарного объема может быть принята равной объему отбираемой пробы. Тогда, при небольшом значении объема пробы, величина  $A$  будет достигать больших значений. Это дает основание считать последовательность случайных значений концентрации ключевого компонента в каждом из  $A$  элементарных объемов генеральной совокупностью.

Генеральная совокупность чисел с нормальным распределением достаточно полно характеризуется их генеральной средней  $\bar{C}_2$  и средним квадратическим отклонением  $S_2$ . Из навозной массы отбирают ограниченное число проб, в результате анализа которых мы получаем  $n_i$  независимых значений величины концентрации  $C_i$  ключевого компонента в пробах [61–63].

Выборочное среднее квадратическое отклонение [64]:

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum_{i=1}^{n_i} (C_i - \bar{C})^2}. \quad (3.7)$$

Численность выборки (число отбираемых проб) должна быть такой, чтобы значения  $\bar{C}$  и  $S$  были близкими по величине, соответственно, к  $\bar{C}_2$  и  $S_2$ , поскольку в этом случае смесь будет достаточно точно охарактеризована.

Так как значение коэффициента неоднородности неизвестно, то необходимо провести предварительные исследования для определения численных значений. Его можно определить предварительным отбором и последующим анализом большого количества проб

либо принять равным 20 %, так как в большинстве промышленных миксеров получают однородность жидкого навоза с качеством не ниже 20 %. Важную роль при количественной оценке качества однородности диспергируемого навоза играет масса отбираемых проб. При выборе массы пробы необходимо учитывать конечное использование приготавливаемой навозной массы и необходимую точность оценки. Анализируемые пробы должны иметь такую массу, при которой случайные отклонения контрольного компонента в них не затушевали бы общую картину его распределения в объеме исследуемой навозной массы. Ю.И. Макаров [61–65] предлагает формулу для определения минимальной массы отбираемой пробы:

$$G_{\min} = \frac{1,26 \cdot 10^4 d_k^3 \rho_k}{C_k}, \quad (3.8)$$

где  $d_k$  – среднеарифметический размер контрольного компонента, м;  
 $\rho_k$  – плотность контрольного компонента, кг/м<sup>3</sup>;  
 $C_k$  – концентрация контрольного компонента в смеси, %.

Согласно ОСТ 70.19.2–83 и методике проведения испытаний машин для перемешивания компонентов смеси [59–63] контрольный компонент (зерна ячменя) для оценки неоднородности диспергируемого жидкого навоза следует вводить в количестве 1,5 % от ее общей массы, отбирая контрольные пробы массой 1,5 кг.

### 3.5. Определение качества смеси

Критерием качества работы миксера для навоза может служить однородность диспергируемой массы жидкого навоза, определяемая по контрольному компоненту, который в необходимом соотношении добавляется в экспериментальную установку одновременно с загруженной перемешиваемой массы жидкого навоза [63–66].

Пробы для определения однородности диспергируемого жидкого навоза были отобраны из экспериментальной установки путем забора их на разных уровнях (верхний, средний, нижний).

По полученному количеству контрольного компонента определяются:

– оценка среднеквадратического отклонения:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n_1 - 1}}, \quad (3.9)$$

где  $\bar{x}_i$  – количество контрольного компонента в пробе, кг;

$\bar{x}$  – среднее значение контрольного компонента в пробе, кг;

$n_1$  – номер пробы;

– относительный коэффициент вариации:

$$n_B = \frac{s}{\bar{x}} 100 = \frac{100}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n_1 - 1}}; \quad (3.10)$$

– степень однородности смеси (%):

$$\lambda = 100 - n_B. \quad (3.11)$$

Исходя из анализа литературных данных работы диспергирующих устройств можно заключить, что равномерность смешивания в начальный период быстро увеличивается, а затем скорость ее изменения уменьшается и, при дальнейшем увеличении времени смешивания, она остается практически неизменной. Устойчивость равномерности обусловлена двусторонним характером протекания процесса. Так, смешивание компонентов происходит одновременно с их сепарацией, и в результате через некоторый момент времени наступает динамическое равновесие смеси. Поэтому определение продолжительности смешивания, необходимой для достижения требуемого качества готовой смеси, является одним из важных параметров, влияющих на работу диспергирующих устройств.

### **3.6. Экспериментальные исследования по определению рациональных режимов работы и параметров миксера для навоза**

#### **3.6.1. Программа и методика исследований, обработка полученных экспериментальных данных**

Для поиска рациональных параметров миксера для навоза использован метод математического планирования эксперимента. Движение к оптимуму возможно, если выбрать один параметр оптимизации, а другие характеристики процесса принять в качестве ограничений [67–72].

Проведение эксперимента выполнялось на установке с двумя лопастями. Это связано с тем, что применение трех- и четырехлопастных мешалок увеличивало энергозатраты при примерно одинаковом значении коэффициента неоднородности жидкого навоза.

Важнейшим показателем работы миксера для навоза является его удельная энергоемкость и качество диспергирования жидкого навоза. Поэтому коэффициент неоднородности жидкого навоза выбираем в качестве параметра оптимизации.

С целью обоснования конструктивных и режимных параметров миксера для навоза проведены экспериментальные исследования, программой которых предусматривалось:

1. Выявление априорным ранжированием факторов, оказывающих наибольшее влияние на производительность миксера для навоза.
2. Проведение многофакторного эксперимента с использованием центрального композиционного ортогонального плана второго порядка  $2^3$ .
3. Обработка полученных экспериментальных данных.
4. Построение поверхностей отклика, отображающих зависимость производительности миксера для навоза от факторов, установленных в результате априорного ранжирования.

На первом этапе исследований осуществлен отбор факторов, предположительно наиболее сильно влияющих на параметр оптимизации процесса (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Факторы, влияющие на однородность жидкого навоза

Обозначение факторов	Наименование фактора
1. Физико-механические свойства навоза	
$x_1$	Плотность навоза
$x_2$	Влажность навоза
$x_3$	Температура навоза
2. Параметры экспериментальной установки	
$x_4$	Число лопастей
$x_5$	Диаметр мешалки
$x_6$	Угол подъема винтовой линии лопастей мешалки
$x_7$	Число оборотов мешалки
3. Технологические факторы	
$x_8$	Коэффициент заполнения емкости навозом
$x_9$	Время диспергирования

На основании анализа литературных источников, представленных в главе 1, установлено, что такие факторы, как диаметр мешалки  $d_m$  (мм) миксера для навоза, угол подъема винтовой линии лопастей мешалки  $\gamma_1$  (град), а также число оборотов мешалки, при диспергировании навоза в навозохранилищах  $n_m$  (мин<sup>-1</sup>) являются наиболее значимыми и недостаточно изучены.

В связи с этим необходимо провести экспериментальные исследования для определения параметров и режимов работы миксера для навоза. Для выделенных трех факторов использован центральный композиционный ортогональный план второго порядка  $2^3$ . Уровни варьирования факторов показаны в табл. 3.2.

Таблица 3.2

## Кодирование варьируемых параметров

Варьируемые факторы	Диаметр мешалки $d_m$ , мм	Число оборотов мешалки $n_m$ , мин <sup>-1</sup>	Угол подъема винтовой линии $\gamma_1$ , град
Кодовое обозначение факторов	$x_1$	$x_2$	$x_3$
Основные уровни ( $x_i=0$ )	500	350	35
Интервалы варьирования	150	50	5
Верхние уровни ( $x_i=+1$ )	650	400	40
Нижние уровни ( $x_i=-1$ )	350	300	30

Основой эксперимента является матрица (табл. 3.3), содержащая условия проведения всех опытов в соответствии с намеченным планом. Для удобства вычислений коэффициентов регрессии все факторы в ходе полного факторного эксперимента варьируют на двух уровнях: нижнем  $-1$  и верхнем  $+1$ , соответствующих значениям кодированных переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Таблица 3.3

## Построение трехфакторного плана первого порядка

№ опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	2	3	4
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
1	2	3	4
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Экспериментальные исследования выполнялись на установке, смонтированной в навозохранилище и состоящей из навозохранилища 1, мешалки 2, привода 3, регулировочных окон 4 (рис. 3.3).

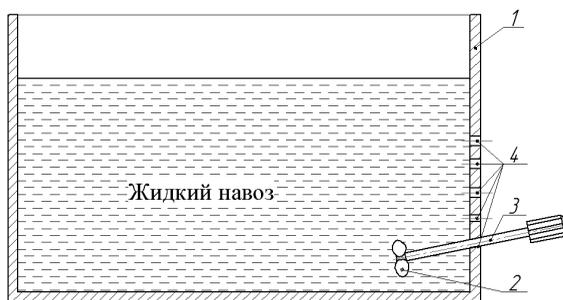


Рис. 3.3. Схема экспериментальной установки:  
 1 – навозохранилище; 2 – мешалка; 3 – привод; 4 – регулировочные окна

Миксер для навоза работает следующим образом. После того как миксер опущен в навозохранилище 1, включается в работу привод 3, что приводит во вращение вал с мешалкой 2. Для лучшего диспергирования навозной массы на разных уровнях миксера выполнены регулировочные окна 4.

При вращении мешалки 2 лопасти захватывают навозную массу и перемещают ее в радиальных направлениях. Радиально направленный лопастями мешалки 2 поток внедряется в навозную массу. При вращении мешалки 2 создается струя потока жидкого навоза, которая внедряется в массу навоза, хранящегося в навозохранилище 1. Кроме того, нисходящая с плоскостей лопастей мешалки 2 навозная масса начинает участвовать в турбулентном движении.

Так как лопасти мешалки 2 отклонены в вертикальной плоскости, то турбулентный поток увлекает радиально перемещающиеся частицы навозной массы в сторону уплотненных слоев навоза, разрушая их.

Одновременно с этим, при вращении мешалки 2, навозная масса захватывается и перемещается по винтовой линии. Причем часть навозной массы, за счет силы инерции, перемещается в осевом направлении, а другая часть навозной массы от действия центробежной силы, создаваемой мешалкой 2, движется по касательной к кромкам лопастей. Так как силы, действующие на навозную массу, различные, то и скорости их потоков различны.

В результате разности скоростей потоков навозной массы образуется перепад давления в диспергируемой массе навоза, следствием чего является образование вихревых потоков навозной массы, что способствует дополнительному диспергированию среды.

При проведении диспергирования навозной массы в лабораторных условиях проводились экспериментально-теоретические исследования по равномерности диспергирования жидкого навоза. Экспериментальные исследования проводились с навозной массой влажностью 94 %. После проведения технологического процесса диспергирования навозной массы влажность в слоях составила:

- в верхнем – 92,8 %;
- в среднем – 92,9 %;
- в нижнем – 92,9 %,

при объемной массе жидкого навоза, кг/м<sup>3</sup>:

- в верхнем слое – 838,0;
- в среднем слое – 853,0;
- в нижнем слое – 847,0.

Температура навозной массы в ходе проведения эксперимента составляла 27 °С при относительной влажности воздуха 58,0 %. Частота вращения рабочего органа составляла 350 мин<sup>-1</sup>. Фракционный состав навозной массы (%), по слоям, с различным размером частиц представлен в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Процентное содержание навозной массы по слоям

Размер частиц, мм	Фракционный состав навозной массы, %
Верхний слой	
До 1,0	79,8
1,1–5,0	12,5
5,1–15,0	3,1
15,1–30,0	3,0
Свыше 30,0	1,6
Средний слой	
До 1,0	71,9
1,1–5,0	14,2
5,1–15,0	5,6
15,1–30,0	7,5
Свыше 30,0	0,8
Нижний слой	
До 1,0	66,2
1,1–5,0	16,4
5,1–15,0	8,8
15,1–30,0	8,1
Свыше 30,0	0,5

Представленный в табл. 3.4 фракционный состав навозной массы показывает, что более крупные частицы жидкого навоза накапливаются в нижнем слое навозной массы, при этом распределение размера частиц по слоям составляет не более 2 %.

В ходе проведения опытов изменяли диаметр мешалки, частоту вращения мешалки, а также угол подъема винтовой линии лопасти мешалки. За параметр оптимизации был выбран коэффициент неравномерности диспергирования жидкого навоза.

Опыты проводились на жидком навозе различной влажности с трехкратной повторностью. При проведении опыта навозохранилище было заполнено жидким навозом, объем которого позволял выйти на установившийся режим работы миксера. Это позволяло отбирать пробы по всему объему навозохранилища для определения относительного коэффициента вариации и степени неоднородности жидкого навоза.

Для построения и анализа регрессионной модели использованы результаты опытов, выполняемых по плану полного трехфакторного эксперимента и композиционному плану. Результаты экспериментов представлены в табл. 3.5 и 3.6.

Таблица 3.5

Результаты экспериментов по линейному плану

№ опыта	У <sub>1</sub>	У <sub>2</sub>	У <sub>3</sub>	У <sub>с</sub>	№ опыта	У <sub>1</sub>	У <sub>2</sub>	У <sub>3</sub>	У <sub>с</sub>
1	26,8	26,2	26,5	26,5	5	19,9	19,5	19,0	19,47
2	18,3	18,6	18,4	18,43	6	17,1	17,8	17,3	17,4
3	18,8	18,6	18,1	18,5	7	15,6	15,5	15,9	15,67
4	14,1	14,2	14,9	14,4	8	18,8	18,2	18,5	18,5

Таблица 3.6

Результаты дополнительных опытов по плану второго порядка

№ опыта	У <sub>1</sub>	У <sub>2</sub>	У <sub>3</sub>	У <sub>кс</sub>	№ опыта	У <sub>1</sub>	У <sub>2</sub>	У <sub>3</sub>	У <sub>кс</sub>
9	14,3	14,1	13,5	13,97	13	13,8	13,1	13,7	13,53
10	19,2	17,1	15,6	17,3	14	19,8	19,4	16,8	18,67
11	13,5	15,9	13,1	14,17	15	13,1	16,8	13,3	14,4
12	19,8	17,4	15,1	17,43					

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась в соответствии с принятыми правилами теории вероятностей и математической статистики и использованием математического пакета MathCad.

Статистическая обработка проводилась с целью проверки адекватности экспериментальным данным.

Находим среднее значение результатов  $i$ -го опыта по формуле

$$y_{ci} = \frac{1}{n_i} \sum_j y_{i,j}. \quad (3.12)$$

По данным параллельных опытов вычисляем построчные выборочные дисперсии с числом степеней свободы  $\nu_n = n_i - 1$  по выражению

$$D_i = \frac{\sum_{j=0}^2 (y_{i,j} - y_{ci})^2}{n_i - 1}. \quad (3.13)$$

Построчные выборочные дисперсии для первых восьми опытов приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Построчные выборочные дисперсии

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$D_i$	0,09	0,023	0,13	0,19	0,203	0,13	0,043	0,09

Гипотезу об однородности дисперсий  $D_i$  при одинаковом числе повторностей во всех  $N$  вариантах опыта проверяем, используя критерий Кохрена:

$$G_k = \frac{\max(D)}{\sum D}. \quad (3.14)$$

Произведя необходимые вычисления, получим  $G_k = 0,2259$ . Данное значение должно удовлетворять условию:

$$G_k < G_{kkp}, \quad (3.15)$$

где  $G_{kkp}$  – табличное значение критерия при уровне значимости  $\alpha$ , числах степеней свободы  $\nu_n$  и  $N$ .

В данном случае  $G_{kkp} = 0,5157$ .

Условие выполняется, следовательно, дисперсии однородны.

Определяем по результатам опытов методом наименьших квадратов, решая относительно неизвестных  $b_0, b_1, \dots, b_k$  систему нормальных уравнений, которая в матричной форме имеет вид:

$$x^T x b = x^T y, \quad (3.16)$$

откуда

$$b = c x^T y, \quad (3.17)$$

где  $x$  и  $x^T$  – матрица независимых переменных и соответствующая ей транспонированная матрица;

$b$  и  $y$  – столбцовые матрицы, соответственно, коэффициентов регрессии  $b_j$  и результатов опытов  $y_u$ ;

$c = (x^T x)^{-1}$  – информационная (ковариационная) матрица, которая является обратной по отношению к матрице системы нормальных уравнений  $x^T x$ .

По результатам расчета коэффициенты регрессии имеют следующие значения:

$$\begin{array}{ll} b_0 = 18,608 & b_4 = 1,108 \\ b_1 = -1,425 & b_5 = 1,617 \\ b_2 = -1,842 & b_6 = 1,167 \\ b_3 = -0,85 & \end{array}$$

После нахождения коэффициентов регрессии необходимо найти доверительный интервал коэффициентов регрессии  $\Delta b$ :

$$\Delta b = t_y \cdot \sqrt{D_b}, \quad (3.18)$$

где  $t_y$  – значение распределения Стьюдента. При доверительном интервале 0,95 равно  $t_y = 2,120$ .

$$D_b = \frac{D_y}{n_i N} - \text{дисперсия, равная } D_b = 4,688 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, проведя все необходимые вычисления, получим  $\Delta b = 0,145$ . Сравнивая полученные ранее значения коэффициента  $b_i$  с  $\Delta b$ , видим, что все коэффициенты больше  $\Delta b$ .

Получаем следующее уравнение регрессии:

$$y_1 = 18,608 - 1,425x_1 - 1,842x_2 - 0,85x_3 + 1,108x_1x_2 + 1,617x_1x_3 + 1,167x_2x_3.$$

Уравнение регрессии адекватно экспериментальным данным, если

$$F < F_{kr}. \quad (3.19)$$

Чтобы оценить ошибку расчетных значений в пределах ошибки воспроизводимости опытов, вычисляем отношение:

$$F = \frac{D_o}{D_a}, \quad (3.20)$$

где  $D_o = \frac{n_i}{N_i - 1} \sum_i (y_{cp} - y_{ci})^2$  – дисперсия воспроизводимости;

$$D_a = \frac{n_i}{N_i - 1} \sum_i (y_{ci} - y_{pi})^2 - \text{дисперсия адекватности.}$$

Определить значение  $y_{pi}$  можно по формуле  $y_{pi} = x \cdot b$ . Результаты расчета приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Значение параметра  $y_p$

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$y_p$	26,617	18,317	18,383	14,517	19,35	17,517	15,783	18,383

Проведя все вычисления, получим:  $D_o = 38,954$ ,  $D_a = 0,327$ ,  $F = 119,247$ .

Сравнивая полученное значение  $F$  с табличным ( $F_{kp} = 3,63$ ), делаем вывод, что полученное уравнение не адекватно экспериментальным данным.

Свободный член линейного уравнения также характеризует сумму коэффициентов при квадратичных членах, которые в случае линейной регрессии полагаем незначительными. Обоснованность линейного приближения проверяем постановкой опытов в центре плана.

Линейное уравнение приемлемо, если разность  $|y_{oc} - \bar{b}_o|$  статистически незначима, т. е. выполняется неравенство:

$$|y_{oc} - \bar{b}_o| < st_y \sqrt{\frac{N_i + n_i}{n_i N_i}}, \quad (3.21)$$

где  $s = \frac{1}{n} [(N_i - 1)D_b + (n_i - 1)D_{yoc}]$  – средневзвешенное двух дисперсий с числом степеней свободы  $n = N_i + n_i - 2$ ;

$t_y = 2,262$  – критическое значение  $t$  – распределение при двухстороннем ограничении, доверительном уровне  $\gamma$  и числе степеней свободы  $\nu$ .

Проведя все вычисления, получим:

$$D_b = 4,688 \cdot 10^{-3}; D_{yoc} = 0,130; \nu = 9; s = 0,18.$$

Так как  $|y_{oc} - \bar{b}_o| = 13,626$ , то неравенство (3.21) неверное, линейное уравнение неприемлемо.

Описание почти стационарной области вблизи экстремума на поверхности отклика обычно достигается использованием полинома второго порядка, для чего надо составить и реализовать такой план, в котором каждая переменная принимает хотя бы три разных значения. Следуя идее шагового эксперимента, целесообразно использовать так называемое композиционное (последовательное планирование), дополнив уже реализованный план первого порядка некоторым количеством экспериментальных точек, которые расположены определенным образом, а именно: поставить эксперимент в центре плана и в  $2k$  «звездных» точках.

Опыты с комбинациями факторов заданы строками 1–8 в табл. 3.9 и представляют собой ПФЭ типа  $2^3$ . Кроме опыта в центре плана (строка 9), дополнительно требуется провести 6 опытов в «звездных» точках строки 10–15 (табл. 3.6).

Таблица 3.9

Матрица ортогонального плана типа  $2^3$  второго порядка

№ опыта	Кодовое значение факторов									
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2+\gamma_1$	$x_2^2+\gamma_1$	$x_3^2+\gamma_1$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	+1	-1	-1	-1	$\gamma_2$	$\gamma_2$	$\gamma_2$	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	-1	$\gamma_2$	$\gamma_2$	$\gamma_2$	-1	-1	+1
3	+1	-1	+1	-1	$\gamma_2$	$\gamma_2$	$\gamma_2$	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	-1	$\gamma_2$	$\gamma_2$	$\gamma_2$	+1	-1	-1
5	+1	-1	-1	+1	$\gamma_2$	$\gamma_2$	$\gamma_2$	+1	-1	-1
6	+1	+1	-1	+1	$\gamma_2$	$\gamma_2$	$\gamma_2$	-1	+1	-1
7	+1	-1	+1	+1	$\gamma_2$	$\gamma_2$	$\gamma_2$	-1	-1	+1
8	+1	+1	+1	+1	$\gamma_2$	$\gamma_2$	$\gamma_2$	+1	+1	+1
9	+1	0	0	0	$\gamma_1$	$\gamma_1$	$\gamma_1$	0	0	0
10	+1	$-\alpha$	0	0	$\gamma_3$	$\gamma_1$	$\gamma_1$	0	0	0
11	+1	$+\alpha$	0	0	$\gamma_3$	$\gamma_1$	$\gamma_1$	0	0	0
12	+1	0	$-\alpha$	0	$\gamma_1$	$\gamma_3$	$\gamma_1$	0	0	0
13	+1	0	$+\alpha$	0	$\gamma_1$	$\gamma_3$	$\gamma_1$	0	0	0
14	+1	0	0	$-\alpha$	$\gamma_1$	$\gamma_1$	$\gamma_3$	0	0	0
15	+1	0	0	$+\alpha$	$\gamma_1$	$\gamma_1$	$\gamma_3$	0	0	0

Исходные данные для статистической обработки взяты из табл. 3.5. По итогам вычислений получены данные среднего значения по результатам дополнительных опытов (табл. 3.6) и среднеквадратические отклонения (табл. 3.10).

Таблица 3.10

Среднеквадратичное отклонение результатов

№ опыта	9	10	11	12	13	14	15
$D_u$	0,173	3,27	2,293	5,523	0,143	2,653	4,33

Гипотеза об однородности дисперсий при одинаковом числе повторностей во всех  $N$  вариантах опыта проверяется с использованием критерия Кохрена:

$$G_k = \frac{\max(D_u)}{\sum D_u}. \quad (3.22)$$

Значение критерия Кохрена равно  $G_k = 0,2864$ . Сравниваем полученное значение с табличным  $G_{knp} = 0,3578$ , где  $G_{knp}$  – табличное значение критерия при уровне значимости  $\alpha$ , числа степеней свободы  $n$  и  $N$ ;

$N$  – число опытов при композиционном планировании равно 15;

$n$  – степень свободы.

Рассчитанный по экспериментальным данным критерий Кохрена меньше табличного значения, следовательно, дисперсии однородны.

Вычисление коэффициентов регрессии производим по формуле

$$b_k = (x^T \cdot x)^{-1} x^T Y_c. \quad (3.23)$$

В результате расчета были получены следующие коэффициенты регрессии:

$$\begin{array}{lll} b_0 = 17,222 & b_3 = -1,094 & b_6 = 1,167 \\ b_1 = -1,388 & b_4 = 1,108 & b_7 = 1,532 \\ b_2 = -1,778 & b_5 = 1,617 & b_8 = 1,363 \\ b_9 = 2,074 & & \end{array}$$

$$b_o = b_{ko} + g_1(b_{k7} + b_{k8} + b_{k9}), \quad (3.24)$$

получаем:  $b_0 = 13,594$ .

После нахождения коэффициентов регрессии необходимо найти доверительный интервал коэффициентов регрессии. Производим следующие вычисления:

$$D_{bk01} = \frac{D_y}{n \cdot \sum_i (x_{i,o})^2}, \quad \sum_i (x_{i,o})^2 = 15, \quad t_k = 2,120 \quad D_{bk01} = 0,029;$$

$$D_{bk11} = \frac{D_y}{n \cdot \sum_i (x_{i,7})^2}, \quad \sum_i (x_{i,7})^2 = 4,361, \quad D_{bk11} = 0,098, \quad \Delta b_{k11} = \sqrt{D_{bk11}} \cdot t_k,$$

$$\Delta b_{k11} = 0,665;$$

$$D_{bk1} = \frac{D_y}{n \cdot \sum_i (x_{i,1})^2}, \quad \sum_i (x_{i,1})^2 = 10,952, \quad D_{bk1} = 0,039, \quad \Delta b_{k1} = \sqrt{D_{bk1}} \cdot t_k,$$

$$\Delta b_{k1} = 0,419;$$

$$D_{bk12} = \frac{D_y}{n \cdot \sum_i (x_{i,4})^2}, \quad \sum_i (x_{i,4})^2 = 8, \quad D_{bk12} = 0,054, \quad \Delta b_{k12} = \sqrt{D_{bk12}} \cdot t_k,$$

$$\Delta b_{k12} = 0,491;$$

$$D_{bko} = D_{bko1} + 3 \cdot g_1^2 \cdot D_{bk11}, \quad D_{bko} = 0,186, \quad \Delta b_{ko} = \sqrt{D_{bko}} \cdot t_k, \quad \Delta b_{ko} = 0,914.$$

Так как все коэффициенты больше своего доверительного интервала, то число значимых коэффициентов регрессии принимаем равным десяти.

Получим следующее уравнение регрессии:

$$y_1 = 13,594 - 1,388x_1 - 1,778x_2 - 1,094x_3 + 1,108x_1^2 + 1,617x_2^2 + 1,167x_3^2 + 1,532x_1x_2 + 1,363x_1x_3 + 2,074x_2x_3.$$

Адекватность уравнения экспериментальным данным и статистическую значимость его коэффициентов проверяем так же, как в случае уравнения регрессии первого порядка.

Определить значение  $y_p$  можно по формуле  $y_p = x \cdot b$ , результаты расчета приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11

Значение параметра  $y_p$

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$y_p$	26,715	18,488	18,61	14,816	18,96	17,2	15,521	18,194
№ опыта	9	10	11	12	13	14	15	
$y_p$	13,594	17,543	14,169	17,766	13,446	17,985	15,326	

Критическое значение  $F$ -распределения для  $\alpha = 0,05$ ,  $F_{kr} = 2,33$ .

Рассчитанное значение  $F = 1,066 < F_{kr} = 2,33$ .

Так как значение критерия Фишера меньше табличного значения, то полученное уравнение адекватно.

Для анализа полученного уравнения построены поверхности отклика (рис. 3.4–3.6). При анализе поверхностей отклика учитываем, что функция отклика  $y$  – коэффициент неоднородности жидкого навоза, должен удовлетворять требованиям, а именно: его значение не должно превышать 20 %.

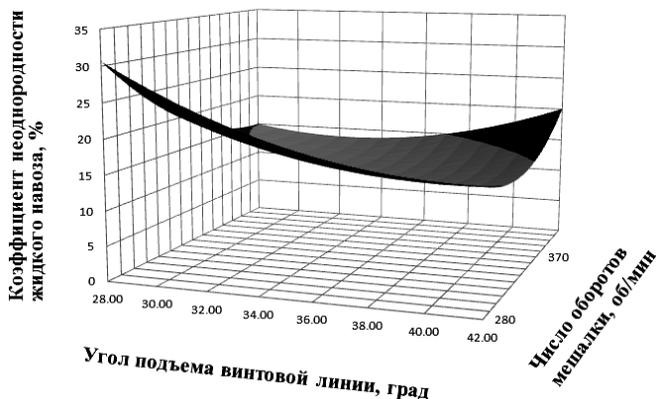


Рис. 3.4. Поверхность отклика зависимости коэффициента неоднородности жидкого навоза от угла подъема винтовой линии и числа оборотов мешалки

Из данного графика (рис. 3.4) видно, что наименьшее значение коэффициента неоднородности жидкого навоза принимает при угле подъема винтовой линии, находящемся в пределах  $32^{\circ}$ – $38^{\circ}$  и числе оборотов мешалки  $340$ – $380 \text{ мин}^{-1}$ .

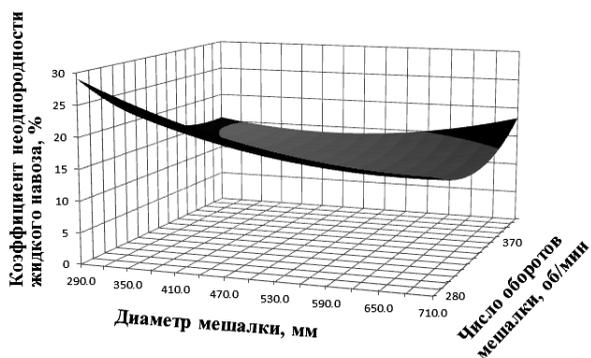


Рис. 3.5. Поверхность отклика зависимости коэффициента неоднородности жидкого навоза от числа оборотов мешалки и диаметра мешалки миксера

Анализ графика (рис. 3.5) показал, что наименьшее значение коэффициент неоднородности жидкого навоза принимает при диаметре мешалки, находящейся в пределах 520–580 мм, и числе оборотов мешалки 340–380 мин<sup>-1</sup>.

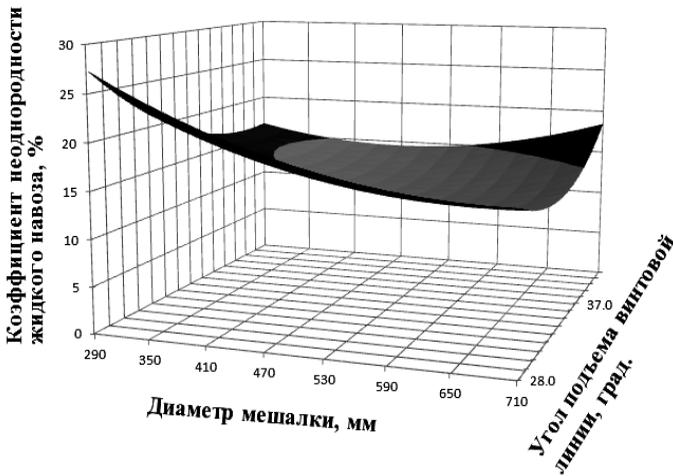


Рис. 3.6. Поверхность отклика зависимости коэффициента неоднородности жидкого навоза от угла подъема винтовой линии лопасти и диаметра мешалки

Из данных графика (рис. 3.6) видно, что при угле подъема винтовой линии лопасти мешалки, находящемся в пределах 32–38°, и диаметре мешалки 520–580 мм будут достигнуты наименьшие значения коэффициента неоднородности жидкого навоза.

Полученные зависимости (рис. 3.4–3.6) позволяют определить рациональные значения факторов для достижения требуемых требований качества диспергирования жидкого навоза. Диаметр мешалки миксера должен находиться в пределах 520–580 мм, угол подъема винтовой линии лопасти мешалки – 32°–38°, число оборотов мешалки миксера – 340–380 мин<sup>-1</sup>.

В соответствии с полученным диапазоном конструктивных размеров миксера принимаем диаметр мешалки равным 550 мм, угол подъема винтовой линии лопасти мешалки – 36°.

### 3.6.2. Результаты исследования энергоемкости процесса диспергирования жидкого навоза миксером

Эффективность технологического процесса диспергирования жидкого навоза характеризуется двумя показателями – энергоемкостью процесса и коэффициентом неоднородности жидкого навоза. Поэтому были проведены опыты для определения зависимости энергоемкости процесса диспергирования жидкого навоза от диаметра мешалки, угла подъема винтовой линии лопасти и числа оборотов мешалки миксера.

Для построения и анализа регрессионной модели использованы результаты опытов, выполненных по плану полного трехфакторного эксперимента и композиционному плану. Результаты экспериментов представлены в табл. 3.12 и 3.13.

Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с использованием математического пакета MathCad.

Статистическая обработка проводится с целью проверки адекватности экспериментальным данным. Средние значения результатов  $i$ -го опыта занесены в табл. 3.12.

Таблица 3.12

Результаты экспериментов по линейному плану

№ опыта	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_c$	№ опыта	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_c$
1	1,55	1,27	1,69	1,51	5	1,85	2,14	2,29	2,09
2	4,56	5,54	6,07	5,39	6	6,69	7,68	8,19	7,52
3	2,08	2,53	2,77	2,46	7	3,03	3,51	3,74	3,42
4	7,72	9,38	10,27	9,12	8	11,23	13,0	13,87	12,70

Таблица 3.13

Результаты дополнительных опытов по плану второго порядка

№ опыта	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_{kc}$	№ опыта	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_{kc}$
9	4,30	5,11	5,53	4,98	13	6,82	8,10	8,76	7,89
10	1,41	1,67	1,81	1,63	14	3,88	3,50	2,83	3,40
11	8,52	10,95	10,13	9,87	15	7,18	6,83	6,07	6,69
12	2,87	2,41	3,10	2,80					

Построчные выборочные дисперсии для первых восьми опытов приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.14

Построчные выборочные дисперсии

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$D_i$	0,046	0,586	0,122	1,680	0,050	0,585	0,132	1,816

Гипотезу об однородности дисперсий  $D_i$  при одинаковом числе повторностей во всех  $N$  вариантах опыта проверяем, используя критерий Кохрена:

$$G_k = \frac{\max(D)}{\sum D}.$$

Произведя необходимые вычисления, получим  $G_k = 0,362$ . Данное значение должно удовлетворять следующему условию:

$$G_k < G_{kkp}.$$

В данном случае  $G_{kkp} = 0,5157$ .

Условие выполняется, следовательно, дисперсии однородны.

Определяем по результатам опытов методом наименьших квадратов, решая относительно неизвестных  $b_0, b_1, \dots, b_k$  систему нормальных уровней.

В результате расчета были получены следующие коэффициенты регрессии:

$$b_0 = 5,527$$

$$b_4 = 0,829$$

$$b_1 = 3,156$$

$$b_5 = 0,519$$

$$b_2 = 1,399$$

$$b_6 = 0,227$$

$$b_3 = 0,908$$

После нахождения коэффициентов регрессии необходимо найти доверительный интервал коэффициентов регрессии

$$\Delta b = t_y \sqrt{D_b}.$$

При доверительном интервале 0,95  $t_y = 2,120$ ,  $D_b = 0,026$ .

Таким образом, проведя все необходимые вычисления, получим  $\Delta b = 0,343$ . Сравнивая полученные ранее значения коэффициента  $b_7$  с  $\Delta b$ , видим, что коэффициент  $b_7$  меньше  $\Delta b$ , поэтому считаем его незначительным и приравниваем к нулю.

Получаем следующее уравнение регрессии:

$$y_2 = 5,527 + 3,156x_1 + 1,399x_2 + 0,908x_3 + 0,829x_1x_2 + 0,519x_1x_3.$$

Уравнение регрессии адекватно экспериментальным данным, если

$$F < F_{kr}.$$

Чтобы оценить ошибку расчетных значений в пределах ошибки воспроизводимости опытов, вычисляем отношение:

$$F = \frac{D_o}{D_a}.$$

Определить значение  $y_{pi}$  можно по формуле  $y_{pi} = x \cdot b$ . Результаты расчета приведены в табл. 3.15.

Таблица 3.15

Значение параметра  $y_p$

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$y_p$	1,638	5,256	2,325	9,257	1,962	7,655	3,558	12,566

Проведя все вычисления, получим:  $D_o = 47,217$ ,  $D_a = 0,43$ ,  $F = 109,908$ .

Сравнивая полученное значение  $F$  с табличным ( $F_{kp} = 3,63$ ), делаем вывод, что полученное уравнение не адекватно экспериментальным данным.

Свободный член линейного уравнения также характеризует сумму коэффициентов при квадратичных членах, которые в случае линейной регрессии полагаем незначительными. Обоснованность линейного приближения проверяем постановкой опытов в центре плана.

Проведя все вычисления, получим:

$$D_b = 0,026; D_{y_{oc}} = 0,130; v = 9; s = 0,222.$$

Так как  $|y_{oc} - b_o| = 0,544$ , то неравенство  $|y_{oc} - b_o| < st_y \sqrt{\frac{N_i + n_i}{n_i N_i}}$

неверное, линейное уравнение неприемлемо.

Дополним уже реализованный план первого порядка некоторым количеством экспериментальных точек, которые расположены определенным образом, а именно: поставить эксперимент в центре плана и в 2k «звездных» точках.

Опыты с комбинациями факторов заданы строками 1–8 в табл. 3.9 и представляют собой ПФЭ типа  $2^3$ . Кроме опыта в центре плана (строка 9), дополнительно требуется провести 6 опытов в «звездных» точках строки 10–15 (табл. 3.13).

Исходные данные для статистической обработки взяты из табл. 3.12. По итогам вычислений получены данные среднего значения по результатам дополнительных опытов (табл. 3.13) и среднеквадратические отклонения (табл. 3.16).

Таблица 3.16

Среднеквадратичное отклонение результатов

№ опыта	9	10	11	12	13	14	15
$D_u$	0,390	0,041	1,526	0,122	0,976	0,284	0,324

Гипотеза об однородности дисперсий при одинаковом числе повторностей во всех  $N$  вариантах опыта проверяется с использованием критерия Кохрена:

$$G_k = \frac{\max(D_u)}{\sum D_u}.$$

Значение критерия Кохрена  $G_k = 0,2092$ . Сравниваем полученное значение с табличным  $G_{kkr} = 0,3578$ .

Рассчитанный по экспериментальным данным критерий Кохрена меньше табличного значения, следовательно, дисперсии однородны.

Вычисление коэффициентов регрессии производим по формуле

$$b_k = (x^T \cdot x)^{-1} x^T Y_c.$$

В результате расчета были получены следующие коэффициенты регрессии:

$$\begin{array}{lll} b_0 = 5,432 & b_3 = 1,028 & b_6 = 0,227 \\ b_1 = 3,220 & b_4 = 0,829 & b_7 = 0,388 \\ b_2 = 1,588 & b_5 = 0,519 & b_8 = 0,116 \\ b_9 = -0,087 & & \end{array}$$

$$b_o = b_{ko} + g_1 \cdot (b_{k7} + b_{k8} + b_{k9}),$$

Получаем  $b_0 = 5,128$ .

После нахождения коэффициентов регрессии необходимо найти доверительный интервал коэффициентов регрессии. Производим следующие вычисления:

$$D_{bk01} = \frac{D_y}{n \cdot \sum_i (x_{i,o})^2}, \quad \sum_i (x_{i,o})^2 = 15, \quad t_k = 2,120, \quad D_{bk01} = 0,013;$$

$$D_{bk11} = \frac{D_y}{n \cdot \sum_i (x_{i,7})^2}, \quad \sum_i (x_{i,7})^2 = 4,361, \quad D_{bk11} = 0,044, \quad \Delta b_{k11} = \sqrt{D_{bk11}} \cdot t_k,$$

$$\Delta b_{k11} = 0,446;$$

$$D_{bk1} = \frac{D_y}{n \cdot \sum_i (x_{i,1})^2}, \quad \sum_i (x_{i,1})^2 = 10,952, \quad D_{bk1} = 0,018, \quad \Delta b_{k1} = \sqrt{D_{bk1}} \cdot t_k,$$

$$\Delta b_{k1} = 0,281;$$

$$D_{bk12} = \frac{D_y}{n \cdot \sum_i (x_{i,4})^2}, \quad \sum_i (x_{i,4})^2 = 8, \quad D_{bk12} = 0,024, \quad \Delta b_{k12} = \sqrt{D_{bk12}} \cdot t_k,$$

$$\Delta b_{k12} = 0,329;$$

$$D_{bko} = D_{bko1} + 3 \cdot g_1^2 \cdot D_{bk11}, \quad D_{bko} = 0,084, \quad \Delta b_{ko} = \sqrt{D_{bko}} \cdot t_k, \quad \Delta b_{ko} = 0,613.$$

Так как коэффициенты  $b_6$ ,  $b_8$  и  $b_9$  меньше своего доверительного интервала, принимаем их равными нулю. Число значимых коэффициентов регрессии принимаем равным семи.

Получим следующее уравнение регрессии:

$$y_2 = 5,432 + 3,22x_1 + 1,588x_2 + 1,028x_3 + 0,829x_1^2 + 0,519x_2^2 + 0,388x_1x_2.$$

Адекватность уравнения экспериментальным данным и статистическую значимость его коэффициентов проверяем так же, как в случае уравнения регрессии первого порядка.

Определим значение  $y_p$  и результаты расчета сведем в табл. 3.17.

Таблица 3.17

Значение параметра  $y_p$

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$y_p$	1,049	4,793	2,567	9,626	2,068	7,887	3,586	12,720
№ опыта	9	10	11	12	13	14	15	
$y_p$	5,149	1,810	9,633	3,220	7,078	3,900	6,398	

Критическое значение  $F$ -распределения для  $a = 0,05$ ,  $F_{kr} = 2,33$ .

Рассчитанное значение  $F = 1,482 < F_{kr} = 2,33$ . Так как значение критерия Фишера меньше табличного значения, то полученное уравнение адекватно.

Для анализа полученного уравнения регрессии построены поверхности отклика (рис. 3.7–3.9).

На рис. 3.7 представлена зависимость энергоемкости процесса диспергирования навоза от угла подъема винтовой линии и частоты вращения мешалки.

Из данных графика (рис. 3.7) видно, что значение энергоемкости процесса диспергирования навоза пропорционально возрастает с увеличением угла подъема винтовой линии и числа оборотов мешалки. При угле подъема винтовой линии лопасти мешалки, равном  $32^\circ$ – $38^\circ$ , и числе оборотов мешалки, равном  $340$ – $380 \text{ мин}^{-1}$ , значение энергоемкости процесса диспергирования жидкого навоза составляет  $2,82$ – $4,18 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ .

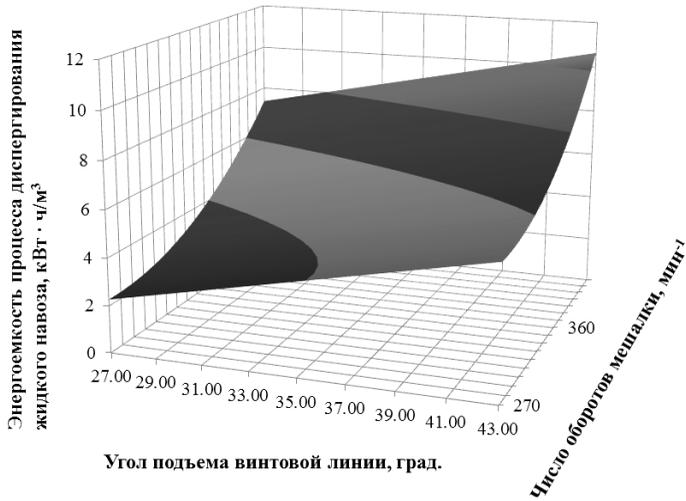


Рис. 3.7. Поверхность отклика зависимости энергоемкости процесса диспергирования жидкого навоза от угла подъема винтовой линии и числа оборотов мешалки

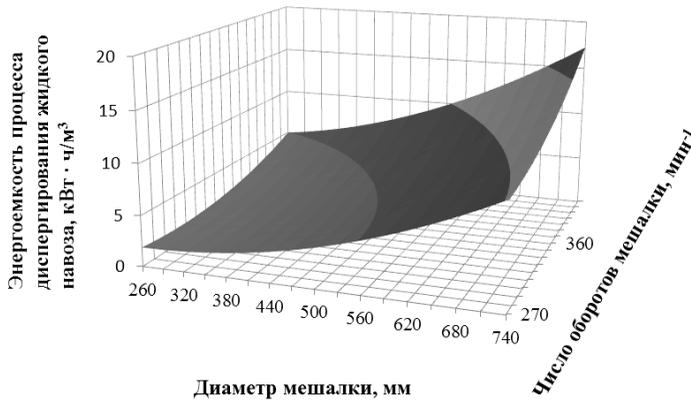


Рис. 3.8. Поверхность отклика зависимости энергоемкости процесса диспергирования жидкого навоза от диаметра и числа оборотов мешалки

Анализ графика (рис. 3.8) показал, что при диаметре мешалки, равном 520–580 мм, и числе оборотов мешалки 340–380 мин<sup>-1</sup> значение энергоемкости процесса диспергирования жидкого навоза составляет 4,28–5,46 кВт·ч/м<sup>3</sup>.

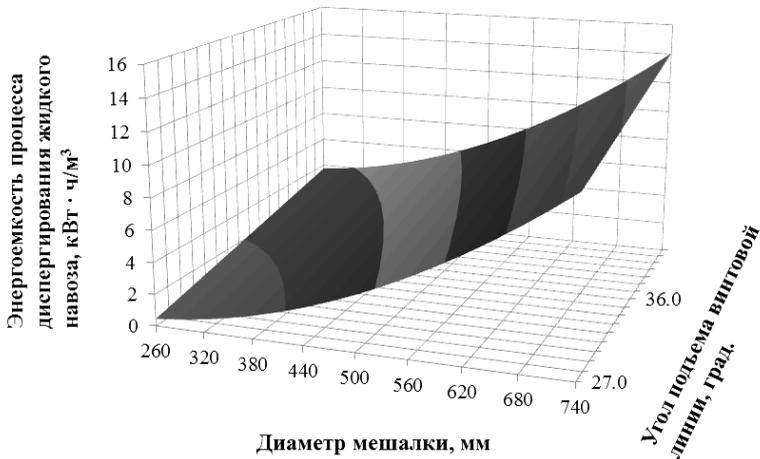


Рис. 3.9. Поверхность отклика зависимости энергоёмкости процесса диспергирования жидкого навоза от угла подъема винтовой линии лопасти и диаметра мешалки

Из данных графика (рис. 3.9) видно, что при угле подъема винтовой линии лопасти мешалки, равном  $32^{\circ}$ – $38^{\circ}$ , и диаметре мешалки, равном 520–580 мм, значение энергоёмкости процесса диспергирования жидкого навоза находится в пределах 3,69–5,13 кВт·ч/м<sup>3</sup>.

Таким образом, по результатам проведения опытов установлено, что значения энергоёмкости процесса диспергирования жидкого навоза миксером при угле подъема винтовой линии лопасти, равном  $32^{\circ}$ – $38^{\circ}$ , числе оборотов мешалки, равном 340–380 мин<sup>-1</sup>, и диаметре мешалки, равном 520–580 мм, находится в пределах 2,82–5,46 кВт·ч/м<sup>3</sup>.

### 3.6.3. Результаты исследования затрат энергии на привод мешалки миксера

Была проведена дополнительная серия опытов для определения зависимости потребной мощности на привод мешалки миксера от принятых ранее факторов при разном числе лопастей мешалки. По результатам опытов получены зависимости потребной мощности от диаметра мешалки с заданным числом лопастей при влажности жидкого навоза от 92 % до 96 % (рис. 3.10, 3.11).

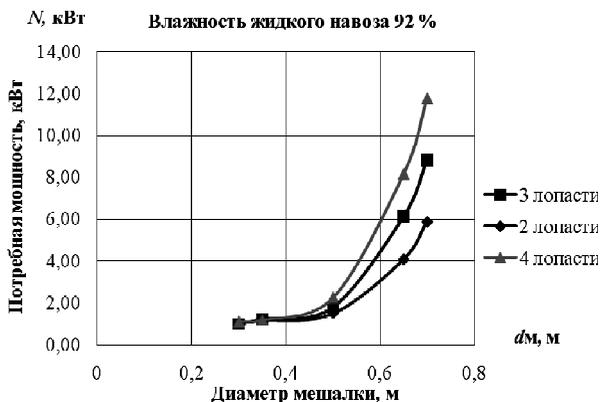


Рис. 3.10. График зависимости потребляемой мощности от диаметра мешалки миксера при значении влажности жидкого навоза 92 %

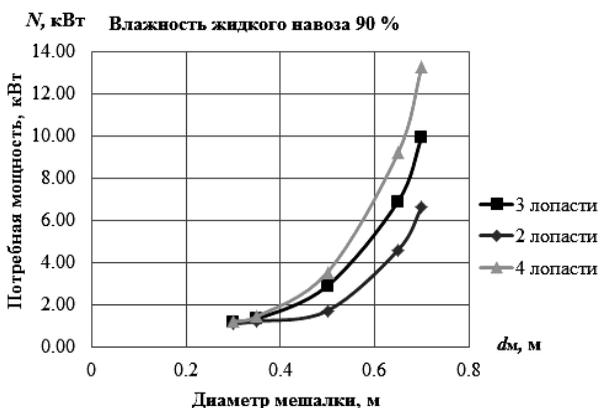


Рис. 3.11. График зависимости потребляемой мощности от диаметра мешалки миксера при значении влажности жидкого навоза 90 %

При определении потребляемой мощности на привод мешалки миксера необходимо учесть значения влажности жидкого навоза и количество лопастей на мешалке. Опыты проводились с жидким навозом разной влажности.

Из данных графиков (рис. 3.10, 3.11) видно, что наименьшая потребляемая мощность при диспергировании жидкого навоза наблюдается с числом лопастей мешалки, равным 2, при диаметре мешалки

миксера, равном 500 мм, и значениях потребной мощности от 1,51 до 3,17 кВт, при разных значениях влажности жидкого навоза. При увеличении диаметра мешалки миксера свыше 500 мм мощность на привод мешалки миксера возрастает.

На рис. 3.12–3.14 представлены графики зависимости потребной мощности от числа оборотов вала мешалки при разных значениях влажности жидкого навоза.

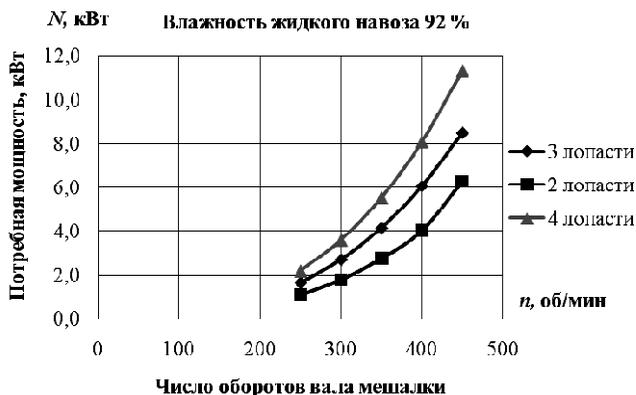


Рис. 3.12. График зависимости потребной мощности от числа оборотов вала мешалки при значении влажности жидкого навоза 92 %

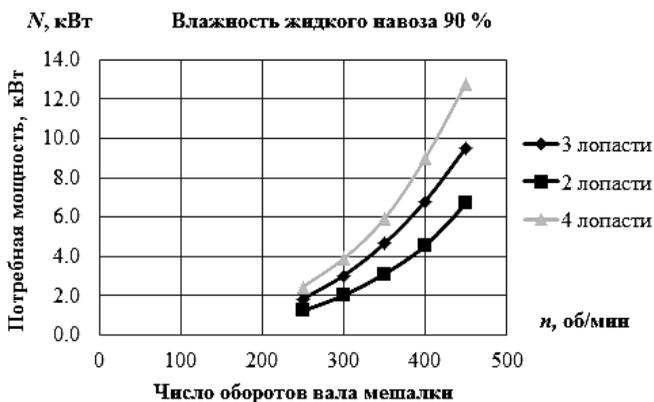


Рис. 3.13. График зависимости потребной мощности от числа оборотов вала мешалки при значении влажности жидкого навоза 90 %

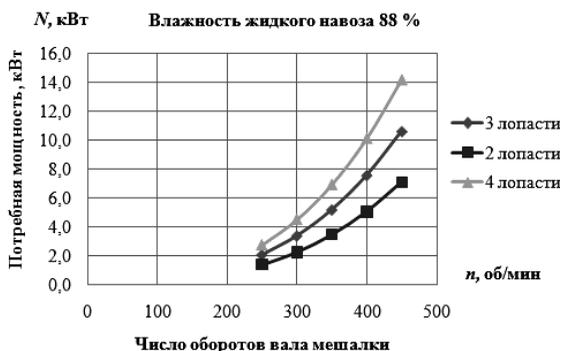


Рис. 3.14. График зависимости потребляемой мощности от числа оборотов вала мешалки при значении влажности жидкого навоза 88 %

Из данных графиков (рис. 3.12–3.14) видно, что с увеличением числа оборотов мешалки пропорционально возрастает потребляемая мощность на ее привод. Наименьшая потребляемая мощность наблюдается у мешалок с числом лопастей 2 и 3. При числе оборотов вала мешалки, равном  $360\text{--}380\text{ мин}^{-1}$ , потребляемая мощность находится в пределах от 3,1 до 5,17 кВт, при разном значении влажности жидкого навоза.

На рис. 3.15–3.17 представлены зависимости потребляемой мощности от угла подъема винтовой линии лопастей мешалки при разном значении влажности жидкого навоза.

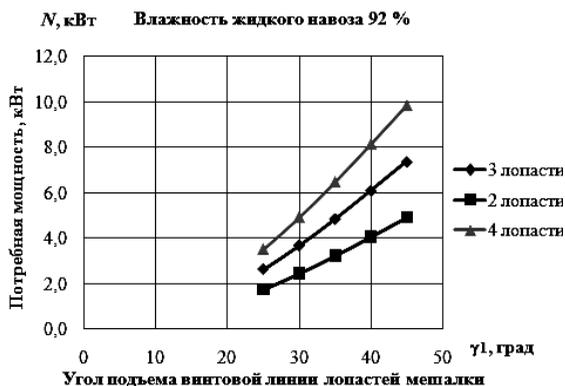


Рис. 3.15. График зависимости потребляемой мощности от угла подъема винтовой линии лопастей мешалки при значении влажности жидкого навоза 92 %

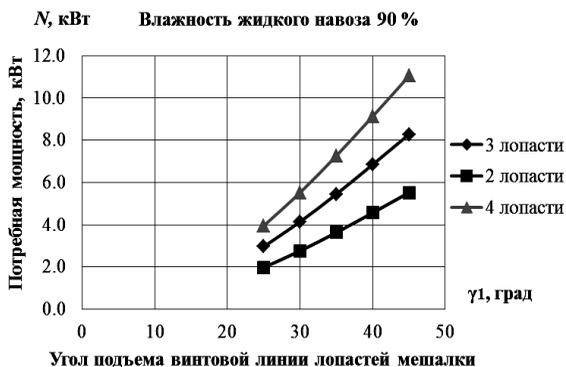


Рис. 3.16. График зависимости потребляемой мощности от угла подъема винтовой линии лопастей мешалки при значении влажности жидкого навоза 90 %

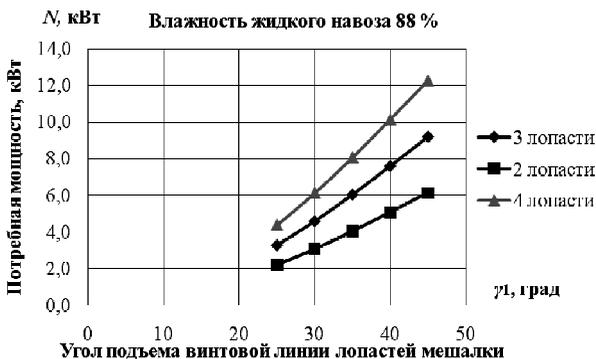


Рис. 3.17. График зависимости потребляемой мощности от угла подъема винтовой линии лопастей мешалки при значении влажности жидкого навоза 88 %

Из данных графиков (рис. 3.15–3.17) видно, что потребляемая мощность на привод мешалки миксера возрастает с увеличением угла подъема винтовой линии лопасти мешалки. Анализ графиков показывает, что при угле подъема винтовой линии лопасти в пределах  $33^{\circ}$ – $38^{\circ}$  потребляемая мощность находится в пределах от 2,76 до 5,45 кВт при разных значениях влажности жидкого навоза.

Анализ полученных зависимостей (рис. 3.10–3.17) показал, что наименьшая потребляемая мощность на привод мешалки миксера достигается при диспергировании жидкого навоза лопастной мешалкой с двумя лопастями.

Для обоснования достоверности однородности жидкого навоза был проведен сравнительный анализ гидравлического и механического способов диспергирования жидкого навоза [73, 74]. Наибольшее значение показателя однородности диспергирования составляет 100 %, что соответствует состоянию полной однородности жидкого навоза в навозохранилище.

На рис. 3.18 представлена зависимость однородности жидкого навоза в навозохранилище от времени диспергирования при использовании гидравлического и механического (базового и модернизированного) способов диспергирования жидкого навоза.

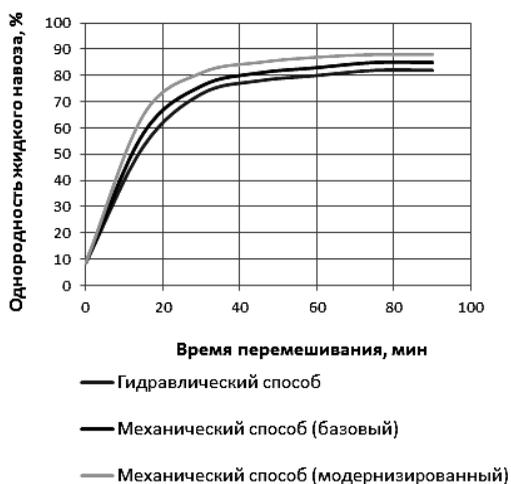


Рис. 3.18. График зависимости показателя однородности жидкого навоза при гидравлическом и механическом способах диспергирования навозной массы

Из данных графика видно (рис. 3.18), что наилучшее качество диспергирования жидкого навоза с объемом навозохранилища  $3000 \text{ м}^3$  достигается механическим способом – время на процесс диспергирования составляет 76 мин (однородность жидкого навоза – 86,7 %), время сравниваемого механического способа диспергирования навозной массы составляет 84 мин (однородность жидкого навоза – 84,4 %). Таким образом, степень однородности жидкого навоза при использовании модернизированной конструкции миксера лопастной мешалкой увеличилась на 2,7 %.

### 3.7. Выводы по главе 3

1. По результатам проведения экспериментально-теоретических исследований были получены зависимости, позволяющие определить рациональные значения параметров мешалки миксера для навоза. Диаметр мешалки миксера должен быть равен не менее 520 мм, угол подъема винтовой линии лопастей мешалки – не менее  $32^\circ$  и число оборотов мешалки – в пределах  $340\text{--}380 \text{ мин}^{-1}$ . При указанных значениях коэффициент неоднородности жидкого навоза находится в пределах  $14,9\% \text{--}19,4\%$ , при этом потребляемая мощность миксера для навоза находится в пределах  $3,1\text{--}5,45 \text{ кВт}$ .

2. При использовании миксера в навозохранилище объемом  $3000 \text{ м}^3$  с модернизированной лопастной мешалкой показатель однородности жидкого навоза составил  $86,7\%$ , степень однородности жидкого навоза по сравнению с базовым вариантом увеличилась на  $2,7\%$ .

## ГЛАВА 4

# РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

### 4.1. Описание конструкции разработанного миксера с лопастной мешалкой

Миксер для навоза представляет собой установку, на валу которой установлена лопастная мешалка для диспергирования жидкого навоза (рисунок).

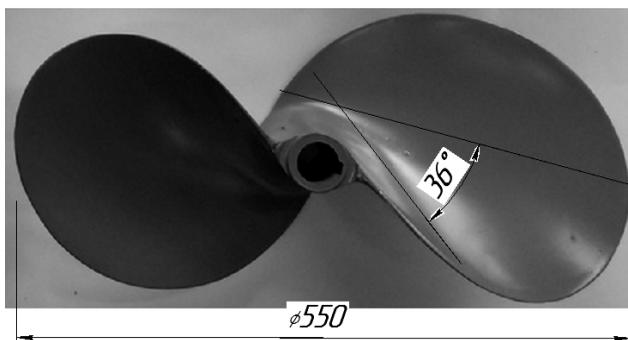


Рисунок. Лопастная мешалка миксера для диспергирования навоза

Лопастная мешалка миксера для навоза разработана с учетом результатов выполненных исследований и рациональных параметров, сформулированных в разделе 3.5; изготовлена на базе погружного миксера для навоза, произведенного ОАО «Реммех».

В ходе исследований было установлено, что в известных конструкциях лопастных мешалок в процессе диспергирования навозная масса налипала на центральную часть лопасти, что впоследствии приводило к ее неравномерному распределению по всей рабочей поверхности мешалки. Указанный недостаток сопровождался рядом отрицательных явлений:

– неравномерное и неполное использование рабочей поверхности лопасти, что снижает эффективность технологического процесса,

уменьшает возможность повышения производительности, ухудшает однородность жидкого навоза;

– неравномерная нагрузка на поверхности лопасти приводит к их неодинаковому износу, что нарушает балансировку мешалки на валу и снижает долговечность ее и машины в целом.

Разработанная лопастная мешалка (см. рис. 4.1) исключает перечисленные недостатки.

Корпус миксера, планетарный редуктор, кронштейн крепления и вал лопастной мешалки использованы без изменения. Конструктивные изменения заключаются в следующем:

– диаметр и угол подъема винтовой линии лопастей мешалки миксера выполнены с учетом результатов исследований и составляют 550 мм и 36° соответственно, что позволило увеличить площадь рабочей поверхности лопасти и производительность миксера в целом;

– принято рациональное количество лопастей мешалки, которая работает в жидком навозе со значением влажности не менее 88 %;

– предложенный угол подъема винтовой линии позволяет без дополнительного устройства устранить налипание навоза на лопастях мешалки посредством воздействия на него центробежной силы и силы тяжести.

Миксер для навоза состоит из герметичного корпуса, внутри которого установлен электродвигатель, передающий вращение через редуктор на вал мешалки. Для равномерного диспергирования слоев жидкого навоза миксер перемещают в навозохранилище по стойке с помощью лебедки. Диспергирование осуществляется лопастной мешалкой. Для более равномерного диспергирования слоев жидкого навоза миксер можно перемещать в вертикальной плоскости.

Разработанная лопастная мешалка обеспечивает равномерное диспергирование жидкого навоза с влажностью не менее 88 % до однородного состояния [75, 76]. Отклонение распределения размера частиц между слоями составляет не более 2 %.

Миксер для навоза работает следующим образом. При вращении лопасти мешалки захватывают навозную массу и перемещают ее, внедряя в массу илистых отложений, осевших за время хранения. Одновременно с этим часть жидкого навоза перемещается по лопасти винта в радиальном направлении, внедряясь в верхние и нижние слои хранящейся навозной массы.

Поскольку верхний коркообразный слой жидкого навоза трудноразрушаемый, то миксер лебедкой поднимают на верхние уровни навозохранилища и изменяют угол относительно вертикальной плоскости, направляя поток жидкого навоза в верхние слои навозной массы и разрушая образовавшуюся за время хранения корку.

Перемешанный до однородного состояния жидкий навоз пригоден для дальнейшей транспортировки к месту его утилизации или переработки.

## 4.2. Результаты производственных испытаний

На основании методики расчета параметров мешалки миксера для навоза в ОАО «Реммех» спроектирован миксер для навоза.

Основная цель производственных испытаний – проверка выбора параметров конструкции лопастной мешалки и режимов работы миксера для навоза, определение соответствия их количественных и качественных показателей к предъявляемым требованиям. Техническая характеристика миксера для навоза приведена в таблица.

*Таблица*

Техническая характеристика миксера для навоза

Показатели	Значения		Отклонения, +/-
	базовый	модернизированный	
Тип	стационарный	стационарный	
Производительность при диспергировании навоза, м <sup>3</sup> /ч, не менее	1500	1650	+150
Максимальная потребная мощность, кВт, не более	5,5	5,4	-0,1
Диаметр рабочего органа, мм, не менее	500	542	+42
Масса, кг, не более	175	175	

Испытание миксера для навоза в производственных условиях проводились в ОАО «Селекционно-гибридный центр «Западный» Брестского района Брестской области. Испытания были проведены в соответствии с программой испытаний по ОСТ 70.19.2–83 «Машины и оборудование для приготовления кормов. Программа и методика испытаний».

За время эксплуатации миксера для навоза в ОАО «Селекционно-гибридный центр «Западный» годовая экономия электроэнергии на внутренние нужды организации составила 2000 кВт·ч.

За время испытаний было перемешено более 30 000 м<sup>3</sup> жидкого навоза. Поломок оборудования не было зафиксировано.

Миксер для навоза выпущен и продан потребителю ОАО «Реммех» в 1 экземпляре.

#### **4.3. Экономическая оценка и реализация результатов исследований**

Расчет экономической эффективности проведен в работах [6] и [25] собственных источников согласно ГОСТ 23728–88 «Основные положения и показатели экономической оценки» [77], ГОСТ 23729–88 «Методы экономической оценки специализированных машин» [78], ГОСТ 23730–88 «Методы экономической оценки универсальных машин и технологических комплексов» [79, 80].

Капитальные вложения исчислялись на основании балансовой стоимости миксера для навоза. Для сравнения проведен расчет миксера для навоза с модернизированной мешалкой и существующей установкой на момент внедрения.

В стоимости производства учтены расходы на изготовление установки и изготовление лопастной мешалки.

Модернизированный миксер для навоза позволяет уменьшить число машин для рассматриваемого технологического процесса и увеличить загрузку его в течение рабочей смены.

Для доставки жидкого навоза в навозохранилище привлекаются машины для внесения жидких органических удобрений, а также насосы для транспортировки жидкого навоза по трубам, что позволяет уменьшить наименование зарезервированных транспортных

средств в пределах сельскохозяйственного предприятия. Предложенная модернизация лопастной мешалки снижает энергоемкость процесса диспергирования жидкого навоза в закрытых навозохранилищах и обеспечивает его перемешивание до однородного состояния.

Установлено, что годовой приведенный экономический эффект от внедрения модернизированной лопастной мешалки составил 6604 руб. (в ценах на 01.07.2019 г.), срок окупаемости – 0,15 года.

Комплексная методика, позволяющая рационально выбрать технологические процессы утилизации и переработки навоза с наименьшим коэффициентом энергоемкости, реализована в ОАО «Селекционно-гибридный центр «Западный» Брестского района Брестской области.

Материалы исследований включены в научно-техническую литературу по механизации животноводства и внедрены в учебный процесс УО «Белорусский государственный аграрный технический университет».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обоснован тип мешалки миксера, обеспечивающей однородность жидкого навоза около 86,7 % [81–92].

Установлено, что при диаметре мешалки, равном 542 мм, числе оборотов мешалки  $350 \text{ мин}^{-1}$  и угле подъема винтовой линии лопасти мешалки, равном  $32^\circ$ , обеспечивающем самоочистку, затраты мощности на процесс диспергирования жидкого навоза составляют 5,4 кВт. При указанных параметрах производительность миксера составила  $1746 \text{ м}^3/\text{ч}$  [93–102].

Экспериментально-теоретическим путем установлены рациональные параметры миксера: диаметр мешалки должен быть не менее 520 мм, угол подъема винтовой линии лопасти – не менее  $32^\circ$  и число оборотов мешалки – в пределах  $340\text{--}380 \text{ мин}^{-1}$ . При указанных параметрах миксера в навозохранилище объемом  $3000 \text{ м}^3$  накопления навоза на лопастях мешалки не наблюдалось [103–105]. Показатель однородности жидкого навоза составил 86,7 % .

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований [106–117] использованы при разработке конструкторской документации и изготовлении опытного образца миксера для навоза РС–ГН 1.00.000 в ОАО «Реммех» (Минск).

Миксер для навоза использован в ОАО «Селекционно-гибридный центр «Западный» Брестского района Брестской области, что позволило снизить энергоемкость процесса диспергирования навоза на 10 %.

Материалы исследований включены в научно-техническую литературу и внедрены в учебный процесс при изучении дисциплины «Технология и техническое обеспечение производственных процессов в животноводстве» для специальности 1-74 06 01 Техническое обеспечение сельскохозяйственного производства.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукашевич, Н. М. Механизация уборки, переработки и хранения навоза и помета / Н. М. Лукашевич. – Мозырь : Белый ветер, 2000. – С. 123–127.
2. Гриб, В. К. Техническое обеспечение процессов в животноводстве / В. К. Гриб, Л. С. Герасимович, С. С. Жук [и др.]; под общ. ред. В. К. Гриба. – Минск : Бел. наука, 2004. – С. 394–469.
3. Стратегия технологического развития Республики Беларусь на период до 2015 года [Электронный ресурс]. – Минск., 2018. – Режим доступа: <http://www.gknt.gov.by/deyatelnost/strany-sng-pravovoe-obespechenie.php>. – Дата доступа: 16.06.20.
4. Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь на 2016–2020 годы [Электронный ресурс]. – Минск., 2018. – Режим доступа: <http://www.gknt.gov.by/deyatelnost/innovatsionnaya-politika/gpir>. Дата доступа: 16.06.20.
5. Капустин, В. П. Энергосберегающая система уборки, транспортировки и переработки жидкого навоза / В. П. Капустин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1999. – № 6. – С. 10.
6. Гриб, В. К. Механизация животноводства / В. К. Гриб. – Минск : Ураджай, 1997. – 640 с.
7. Васильев, В. А. Справочник по органическим удобрениям / В. А. Васильев, Н. В. Филиппова; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Росагропромиздат, 1988. – 255 с.
8. Вейнла, В. Э. Система удаления подстилочного навоза из боксовых коровников / В. Э. Вейнла, М. М. Аси // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1997. – № 7. – С. 13.
9. Arthur, C. Schlicht. The Gaslifter. A time-honored, proven anaerobic digester mixing system / Arthur C. Schlicht. – Aurora : Walker Process Equipment, 2001. – P. 12.
10. Казаровец, Н. В. Организация и технология производства продукции животноводства / Н. В. Казаровец [и др.]. – Минск : Беларусь, 2008. – 232 с.
11. Капустин, В. П. Обоснование способов и средств переработки бесподстилочного навоза / В. П. Капустин. – Тамбов : ТГТУ, 2002. – 80 с.

12. Бондаренко, А. М. Подготовка органических удобрений на свиноводческих фермах / А. М. Бондаренко // Механизация и электрификация сельского хозяйства – 2005. – № 3. – С. 3–4.
13. Методические рекомендации по проектированию систем удаления и переработки навозных стоков на свинокомплексах промышленного типа. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 84 с.
14. Turnbull, J. E., Hore, F. R. and Feldman, M. 1971. A land recycling liquid manure system for a large scale confinement operation in a cold climate. In: Livestock Waste Management, ASAE, St. Joseph. MI 49085, p. 39–43.
15. Тесленко, И. И. Энергосберегающая технология уборки и консервации навозной массы на крупных комплексах / И. И. Тесленко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – № 7. – С. 12–13.
16. Официальный интернет-портал Украины [Электронный ресурс] / Киев, 2009. – Режим доступа: <http://walfuttech.com.ua>. – Дата доступа: 24.12.2009.
17. Bagge, E., Sahlström, L. and Albiñ, A. 2005. The effect of hygienic treatment on the microbial flora of biowaste at biogas plants. In : Water Res. 39, 4879–4886.
18. Официальный интернет-портал Украины [Электронный ресурс] / Киев, 2009. – Режим доступа: <http://ekoservis.com.ua/msx.htm>. – Дата доступа: 24.12.2009.
19. Ворошилов, Ю. И. Очистка, утилизация и влияние на природную среду сточных вод животноводческих комплексов. / Ю. И. Ворошилов. – М. : ВНИИТЭИСХ, 1979. – 58 с.
20. Веденев, А. Г. Биогазовые технологии в Кыргызской Республике / А. Г. Веденев, Т. А. Веденева. – Бишкек : Евро, 2006. – 90 с.
21. Емцев, Б. Т. Техническая гидромеханика / Б. Т. Емцев. – М. : Машиностроение, 1987. – 440 с.
22. Повх, И. Л. Техническая гидромеханика / И. Л. Повх. – Л. : Машиностроение, 1976. – 504 с.
23. Карасев, Б. В. Основы гидравлики, гидравлические машины и сельскохозяйственное водоснабжение / Б. В. Карасев, В. И. Дечев. – Минск : Урожай, 1965. – 293 с.
24. Есьман, И. Г. Гидравлика / И. Г. Есьман. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л. : ГОНТИ НКТП СССР, 1938. – 368 с.

25. Краснов, А. Е. Основы спектральной квалиметрии жидких сред / А. Е. Краснов [и др.]. – М. : Юриспруденция, 2006. – 346 с.

26. Панаиотти, С. С. Основы расчета и автоматизированное проектирование лопастных насосов с высокой всасывающей способностью : учебное пособие / С. С. Панаиотти. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 48 с.

27. Николаева, С. В. Разработка моделей рецептурных смесей пищевых продуктов в условиях информационной неопределенности: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. – М. : МГТА, 2003. – 116 с.

28. Галимзянов, Ф. Г. Термодинамические и газодинамические расчеты авиационных ТРД: Лопаточные машины (Осевые компрессоры) : учебное пособие / Ф. Г. Галимзянов; отв. ред. З. Г. Шайхутдинов. – Уфа : УАИ, 1978. – 100 с.

29. Ржавин, Ю. А. Осевые и центробежные компрессоры двигателей летательных аппаратов. Теория, конструкция и расчет / Ю. А. Ржавин. – М. : МАИ, 1995. – 344 с.

30. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Л. : Химия, 1984. – 336 с.

31. Емин, О. Н. Выбор параметров и газодинамический расчет осевых компрессоров и турбин авиационных ГТД : учебное пособие / О. Н. Емин, В. Н. Карасев, Ю. А. Ржавин. – М. : Дипак, 2003. – 156 с.

32. Дамдинова, Д. Р. Машины для перемешивания материалов / Д. Р. Дамдинова. – Улан-Удэ : ВСГТУ, 2000. – 140 с.

33. Байсоголов, В. Г. Механическое и транспортное оборудование заводов огнеупорной промышленности / В. Г. Байсоголов. – М. : Металлургия, 1981. – 296 с.

34. Иванов, О. П. Аэродинамика и вентиляторы : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки» / О. П. Иванов, В. О. Мамченко. – Л. : Машиностроение, 1986. – 280 с.

35. Александров, В. Л. Воздушные винты / В. Л. Александров. – М. : Гос. изд-во оборонной пром-ти, 1951. – 447 с.

36. Мелашенко, В. И. Методическое пособие по профилированию лопастей рабочих колес центробежных насосов : в 2 ч. / В. И. Мелашенко, А. В. Зуев. – М. : МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1980. – Ч. 2. – 348 с.

37. Карасев, И. Н. Исследования работы радиально-лопастных мешалок в цилиндрических сосудах с плоским днищем /

И. Н. Карасев, С. Я. Гзовский // Химическое машиностроение. – 1966. – № 1. – С. 38–40.

38. Глазовский, С. Я. Исследования кинематики потока при перемешивании жидкости радиально-лопастными мешалками / С. Я. Глазовский // Химическое машиностроение. – 1959. – № 6. – С. 23–26.

39. Белоусов, А. Н. Проектный термогазодинамический расчет основных параметров авиационных лопаточных машин / А. Н. Белоусов [и др.]. – Самара : СГАУ, 2006. – 316 с.

40. Кафаров, В. В. Процессы перемешивания в жидких средах / В. В. Кафаров. – М. : Госхимиздат, 1949. – 230 с.

41. Краснов, А. Е. Моделирование жидких сред / А. Е. Краснов [и др.] // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2009. – № 3. – С. 41–44.

42. Карпушкин, С. В. Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов : учебное пособие / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А. В. Борисенко. – Тамбов : ТГТУ, 2009. – 168 с.

43. Башта, Т. М. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы / Т. М. Башта [и др.]. – М. : Машиностроение, 1982. – 433 с.

44. Холщевников, К. В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин : учебник для авиационных вузов / К. В. Холщевников. – М. : Машиностроение, 1970. – 610 с.

45. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н. И. Кленин, В. А. Сакун. – М. : Колос, 1994. – 751 с.

46. Агроскин, И. И. Гидравлика / И. И. Агроскин, Г. Т. Дмитриев, Ф. И. Пикалов. – М. : Госэнергоиздат, 1964. – 236 с.

47. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. / Ф. Стренк; под ред. И. А. Щупляка. – Л. : Химия, 1975. – 384 с.

48. Караева, Ю. В. Математическая модель движения двухфазной газожидкостной среды в цилиндрическом ферментаторе биогазовой установки / Ю. В. Караева, Е. К. Вачагина // Альтернативная энергетика и экология. – 2009. – № 10. – С. 79–84.

49. Шаяхметов, Р. Г. Исследование способов перемешивания в метантенках / Р. Г. Шаяхметов // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – М. : Издательский дом «Орион», 2011. – № 4 (40). – С. 18–20.

50. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: програм. введ. в планир. эксперимента / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1971. – 283 с.

51. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 340 с.
52. Тихомиров, В. Б. Математические методы планирования эксперимента при изучении нетканых материалов / В. Б. Тихомиров. – М. : Легкая индустрия, 1968. – 158 с.
53. Раскатова, Е. А. Исследование процесса образования сыпучих смесей в кормоприготовлении и его механизация : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Е. А. Раскатова; Моск. ин-т механизации и электрификации сел. хоз-ва. – М., 1956. – 15 с.
54. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, М. П. Рощин. – Л. : Колос, 1980. – 200 с.
55. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск : БГУ, 1982. – 302 с.
56. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.
57. Комаров, Б. А. Исследование непрерывного процесса смешивания кормов с солями микроэлементов / Б. А. Комаров // Тр. Всерос. науч.-исслед. ин-та механизации и электрификации сел. хоз-ва. – М., 1968. – Вып. 11. – С. 130–143.
58. Караева, Ю. В. Оценка качества перемешивания в реакторах метанового брожения / Ю. В. Караева [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 10. – С. 226–230.
59. Румпшинский, Л. З. Математическая обработка результатов экспериментов : справочное руководство / Л. З. Румпшинский. – М. : Наука, 1971. – 192 с.
60. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментального исследования и обработки данных. Введение и обработка опытных данных / Г. В. Веденяпин. – М. : Колос, 1973. – 3-е изд., перераб. и доп. – 199 с.
61. Вознесенский, В. А. Принятие решения по статистическим моделям / В. А. Вознесенский, А. Ф. Ковальчук. – М. : Статистика, 1978. – 192 с.
62. Бохан, Н. И. Планирование экспериментов в исследованиях по механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства : учебное пособие для сельхозвузов / Н. И. Бохан,

А. М. Дмитриев, И. С. Нагорский; Белорус. с.-х. акад. – Горки : БСХА, 1986. – 78 с.

63. Митков, А. Л. Статические методы в сельскохозяйственном машиностроении / А. Л. Митков, С. В. Кардашевский. – М. : Машиностроение; София : Земиздат, 1978. – 360 с.

64. Валге, А. М. Обработка экспериментальных данных и моделирование динамических систем при проведении исследований по механизации сельскохозяйственного производства / А. М. Валге. – СПб. : СЗНИИМЭСХ, 2002. – 174 с.

65. Шторм, Р. Теория вероятности. Математическая статистика. Статистический контроль качества / Р. Шторм ; пер. с нем.; под ред. Н. С. Райбмана. – М. : Мир, 1970. – 368 с.

66. Валге, А. М. Повышение эффективности работы сельскохозяйственной техники путем моделирования процессов на стадии исследования и разработки технологий и машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / А. М. Валге. – СПб. : СПбГАУ, 2000. – 300 с.

67. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер. – М. : Металлургия, 1969. – 159 с.

68. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экспериментальных исследований / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1967. – 154 с.

69. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М. : Мир, 1971. – 283 с.

70. Элементы методики математической обработки результатов экспериментальных исследований / П. М. Василенко. – М. : ВИМ, 1958. – 329 с.

71. Испытание сельскохозяйственных машин / Г. М. Кукта. – М. : Машиностроение, 1964. – 213 с.

72. Сборник зоотехнических требований на комплекты машин и оборудование для комплексной механизации животноводческих ферм. – М. : ВНИИЭСХ, 1968. – С. 112–114.

73. Трахунова, И. А. Повышение эффективности анаэробной переработки органических отходов в метантенке с гидравлическим перемешиванием на основе численного эксперимента : дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – Казань : КИЦ РАН, 2014. – 114 с.

74. Венецкий, И. Г. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе. Справочник / И. Г. Венецкий, В. И. Венецкая. – М. : Статистика, 1979. – 447 с.

75. Гомогенизатор для навоза: пат. 7700 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / А. В. Китун, И. М. Швед, В. И. Передня; заявитель УО «БГАТУ». – № u 20110318; заявл. 21.04.2011; опубл. 30.10.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5. – С. 202–203.

76. Гомогенизатор для навоза: пат. 7905 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / Д. Ф. Кольга, И. М. Швед, В. С. Сыманович; заявитель УО «БГАТУ». – № u 20110491; заявл. 17.06.2011; опубл. 28.02.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 1. – С. 191.

77. ГОСТ 23728–88. Техника сельскохозяйственная. Основные положения и показатели экономической оценки / Государственный комитет СССР по стандартам. – Введ. 01.01.89. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. – 3 с.

78. ГОСТ 23729–88. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки специализированной техники / Государственный комитет СССР по стандартам. – Введ. 01.01.89. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. – 9 с.

79. ГОСТ 23730–88. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки универсальных машин и технических комплектов / Государственный комитет СССР по стандартам. – Введ. 01.01.89. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. – 13 с.

80. Методические указания по определению экономической эффективности удобрений и других средств химизации, применяемых в сельском хозяйстве. – М. : Колос, 1979. – 32 с.

81. Кольга, Д. Ф. Энергосберегающие и улучшающие экологию средства уборки навоза / Д. Ф. Кольга [и др.] // Инженерный вестник. – Минск, 2010. – № 1 (29). – С. 63–65.

82. Кольга, Д. Ф. Животноводческие фермы и комплексы – источник экологического давления на окружающую среду / Д. Ф. Кольга, И. М. Швед // Агропанорама. – Минск, 2010. – № 4. – С. 32–34.

83. Китун, А. В. Определение мощности на привод винта гомогенизатора / А. В. Китун, И. М. Швед // Агропанорама. – Минск, 2012. – № 4. – С. 14–15.

84. Швед, И. М. Уравнение движения частицы вдоль радиуса мешалки / И. М. Швед [и др.] // Агропанорама. – Минск, 2013. – № 1. – С. 2–4.

85. Швед, И. М. Определение диаметра и угла подъема лопасти мешалки / И. М. Швед [и др.] // Вести НАН Беларуси. – Минск, 2014. – № 3. – С. 92–97.

86. Китун, А. В. Эффективность использования механического способа диспергирования жидкого навоза / А. В. Китун, И. М. Швед // Агропанорама. – Минск, 2018. – № 3. – С. 35–37.

87. Швед, И. М. Определение циркуляционного расхода субстрата в ферментаторах / И. М. Швед, А. В. Китун, В. И. Передня // Механизация и электрификация сельского хозяйства : межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2016. – Вып. 50. – С. 187–193.

88. Кольга, Д. Ф. Обоснование выбора хранилища для жидкого навоза / Д. Ф. Кольга, И. М. Швед, И. И. Скорб // Современная сельскохозяйственная техника : исследование, проектирование, применение : матер. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–28 мая 2010 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: В. Н. Дашков [и др.]. – Минск, 2010. – Ч. 1. – С. 180–182.

89. Скорб, И. И. Пленочные лагуны для хранения навоза / И. И. Скорб, И. М. Швед, О. С. Шавкунова // Современная сельскохозяйственная техника: исследование, проектирование, применение : матер. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–28 мая 2010 г.: в 2 ч. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: В. Н. Дашков [и др.]. – Минск, 2010. – Ч. 1. – С. 188–190.

90. Китун, А. В. Снижение энергозатрат при перемешивании навоза миксером / А. В. Китун [и др.] // Инновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции: докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 14–15 апреля 2011 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2011. – С. 245–248.

91. Скорб, И. И. Исследования процесса перемешивания навоза гомогенизатором / И. И. Скорб, И. М. Швед, В. С. Сыманович // Инновационные технологии в производстве и переработке сельскохозяйственной продукции : докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 14–15 апреля 2011 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2011. – С. 234–236.

92. Швед, И. М. Хранилища для навоза – средство охраны окружающей среды / И. М. Швед, И. И. Скорб // Научно-инновационная деятельность в АПК : сб. науч. статей 5-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 апреля 2011 г.: в 2 ч. / Бело-

рус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2011. – Ч. 2. – С. 255–256.

93. Кольга, Д. Ф. Энергосбережение при перемешивании навоза миксером / Д. Ф. Кольга, И. М. Швед // Механізація, екологізація та конвертація біосировини у тваринництві : зб. наук. праць Інституту механізації тваринництва НААН України. – Вип. 2 (8). – Запоріжжя : ІМТ НААН, 2011. – С. 182–186.

94. Швед, И. М. Теоретическое определение мощности на привод винта гомогенизатора, заключенного в цилиндрический кожух / И. М. Швед, А. В. Китун // Роль непрерывного образования и вузовской науки в инновационном развитии АПК : матер. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 26–28 января 2012 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2012. – С. 213–217.

95. Дедок, Н. Н. Пути совершенствования винтовой мешалки с целью снижения эксплуатационных затрат / Н. Н. Дедок, И. М. Швед, А. В. Китун // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции : докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 21–22 марта 2013 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2013. – С. 99–103.

96. Швед, И. М. Снижение всасывающего эффекта в рабочей зоне мешалки / И. М. Швед, А. В. Китун, Е. А. Доманович, Д. С. Ефремов // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 8–9 июня 2016 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: Н. Н. Романюк [и др.]. – Минск, 2016. – С. 374–378.

97. Romaniuk, W. Okreslenie cisnienia powstalego w komorze fermentacyjnej w wyniku mieszania / W. Romaniuk, I. Shved, A. Kitun, V. Perednya // Problems of intensification of animal production including environment protection and alternative energy production as well as biogas. – Falenty–Warsawa, 2016. – Rok XXII. – P. 180–182.

98. Швед, И. М. Определение угла расширения струи потока жидкого навоза / И. М. Швед // Перспективи і тенденції розвитку конструкторської та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь : збірник тез., III Всеукраїнська науково-практична конференція, Житомир, 29–30 березня 2017 р. / Житомирський нац. агрокол. ун-т. – Житомир : ЖНАЕУ, 2017. – С. 80–82.

99. Швед, И. М. Определение длины активного участка струи потока жидкого навоза / И. М. Швед, А. В. Китун // Передовые технологии и техническое обеспечение сельскохозяйственного

производства : докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 30–31 марта 2017 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2017. – С. 212–215.

100. Швед, И. М. Определение объема активного участка струи потока жидкого навоза / И. М. Швед, М. И. Чурилов // Передовые технологии и техническое обеспечение сельскохозяйственного производства : докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 30–31 марта 2017 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2017. – С. 215–218.

101. Швед, И. М. Определение скорости движения жидкого навоза при перемешивании миксером / И. М. Швед // Передовые технологии и техническое обеспечение сельскохозяйственного производства : докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 30–31 марта 2017 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2017. – С. 218–221.

102. Швед, И. М. Определение параметров струи потока жидкого навоза / И. М. Швед, А. В. Китун, В. Романюк // Проблемы интенсификации животноводства с учетом охраны окружающей среды и производства альтернативных источников энергии, в том числе биогаза : сб. науч. статей Междунар. науч. конф., Фаленты – Варшава 21–24 сентября 2017 г. / Институт технологических и естественных наук в Фалентах ; под ред. Вацлава Романюка. – Фаленты; Варшава, 2017. – С. 189–194.

103. Швед, И. М. Технологические параметры работы миксера для навоза / И. М. Швед // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 22–24 ноября 2017 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: В. Б. Ловкис [и др.]. – Минск, 2017. – С. 211–215.

104. Кольга, Д. Ф. Выбор субстрата биогазовой установки / Д. Ф. Кольга, И. М. Швед // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сб. науч. статей Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 22–24 ноября 2017 г. / Беларус. гос. аграр. техн. ун-т; редкол.: В. Б. Ловкис [и др.]. – Минск, 2017. – С. 361–363.

105. Швед, И. М. Экономическая эффективность миксера при диспергировании жидкого навоза / И. М. Швед // Современные инновации : актуальные проблемы III тысячелетия / Сб. ст. по материалам VIII Междунар. заоч. науч.-практ. конф., Москва, 15–16 мая

2018 г. / гл. редактор С. В. Вальцев. – М. : Проблемы науки, 2018. – № 1 (23).– С. 40–43.

106. Гомогенизатор для навоза: пат. 7161 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / А. В. Китун, И. М. Швед, В. И. Передня; заявитель БГАТУ. – № u 20100766; заявл. 08.09.2010; опубл. 30.04.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 151.

107. Гомогенизатор для навоза: пат. 7203 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / А. В. Китун, И. М. Швед, В. И. Передня; заявитель БГАТУ. – № u 20100799; заявл. 22.09.2010; опубл. 30.04.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 151–152.

108. Гомогенизатор для навоза: пат. 7300 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / А. В. Китун, И. М. Швед, В. И. Передня; заявитель БГАТУ. – № u 20100905; заявл. 29.10.2010; опубл. 30.06.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 3. – С. 163–164.

109. Устройство для обработки полужидкого навоза: пат. 7579 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / А. В. Китун, И. М. Швед, В. И. Передня; заявитель БГАТУ. – № u 20101020; заявл. 07.12.2010; опубл. 30.12.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5. – С. 202.

110. Гомогенизатор для навоза: пат. 7700 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / А. В. Китун, И. М. Швед, В. И. Передня; заявитель БГАТУ. – № u 20110318; заявл. 21.04.2011; опубл. 30.10.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5. – С. 202–203.

111. Гомогенизатор для навоза: пат. 7747 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / А. В. Китун, И. М. Швед, В. И. Передня; заявитель БГАТУ. – № u 20110262; заявл. 07.04.2011; опубл. 30.12.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 6. – С. 189.

112. Гомогенизатор для навоза: пат. 7772 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / А. В. Китун, И. М. Швед, В. И. Передня; заявитель БГАТУ. – № u 20110380; заявл. 14.05.2011; опубл. 30.12.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 6. – С. 189.

113. Гомогенизатор для навоза: пат. 7905 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / Д. Ф. Кольга, И. М. Швед, В. С. Сыманович; заявитель БГАТУ. – № u 20110491; заявл. 17.06.2011; опубл. 28.02.2012 //

Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 1. – С. 191.

114. Гомогенизатор для навоза: пат. 8068 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / А. В. Китун, И. М. Швед, В. И. Передня; заявитель БГАТУ. – № u 20110736; заявл. 28.09.2011; опубл. 30.04.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 2. – С. 191.

115. Гомогенизатор для навоза: пат. 9397 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / А. В. Китун, И. М. Швед, В. И. Передня, Ю. С. Биза; заявитель БГАТУ. – № u 20120960; заявл. 05.11.2012; опубл. 30.08.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 4. – С. 205.

116. Гомогенизатор для навоза: пат. 9775 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / А. В. Китун, И. М. Швед, В. И. Передня, Ю. В. Бруенков; заявитель БГАТУ. – № u 20130509; заявл. 13.06.2013; опубл. 30.12.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 6. – С. 212.

117. Гомогенизатор для навоза: пат. 10065 Респ. Беларусь, МПК А 01С 3/00 / В. С. Сыманович, И. И. Скорб, И. М. Швед; заявитель БГАТУ. – № u 20130811; заявл. 14.10.2013; опубл. 30.04.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 2. – С. 196.

## **ДЛЯ ЗАПИСЕЙ**

## **ДЛЯ ЗАПИСЕЙ**

**ДЛЯ ЗАПИСЕЙ**

Научное издание

**Швед** Илья Михайлович

ДИСПЕРГИРОВАНИЕ НАВОЗА В ЗАКРЫТЫХ  
НАВОЗОХРАНИЛИЩАХ МИКСЕРОМ  
С САМООЧИЩАЮЩИМИСЯ ЛОПАСТЯМИ

Ответственный за выпуск *И. С. Крук*  
Редактор *Т. В. Каркоцкая*  
Компьютерная верстка *Д. О. Сенькевич*  
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 17.06.2020. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 8,14. Уч.-изд. л. 6, 36. Тираж 100 экз. Заказ 288.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.