

Двтор едр.
К 95
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ МУКОМОЛЬНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ЭЛЕВАТОРНОГО ХОЗЯЙСТВА
имени И. В. СТАЛИНА

На правах рукописи

Инж. КУЦЕНКО К. И.

С40
К

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МЕХАНИКИ ЗЕРНОВОЙ
СМЕСИ В СВЯЗИ С АВТОМАТИЗАЦИЕЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕЛЬНИЦ
И ЭЛЕВАТОРОВ

Научный руководитель — кандидат технических наук,
доцент ПЛАТОНОВ П. Н.

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ,
ПРЕДСТАВЛЕННОЙ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК.

1952 г.

сн

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ МУКОМОЛЬНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ЭЛЕВАТОРНОГО ХОЗЯЙСТВА
имени И. В. СТАЛИНА

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

Инж. КУЦЕНКО К. И.

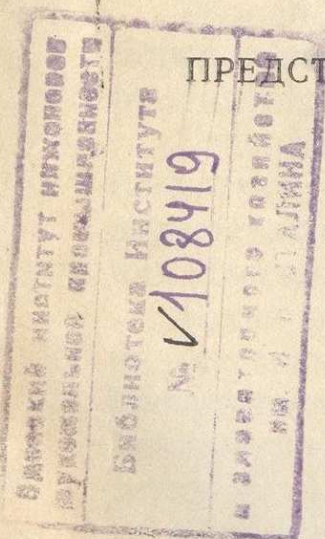
С40

Перечисл 1981 г. К

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МЕХАНИКИ ЗЕРНОВОЙ
СМЕСИ В СВЯЗИ С АВТОМАТИЗАЦИЕЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕЛЬНИЦ
И ЭЛЕВАТОРОВ

Научный руководитель — кандидат технических наук
доцент ПЛАТОНОВ Н. П.

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ,
ПРЕДСТАВЛЕННОЙ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК.



ОНАХТ

20.07.12

Некоторые вопросы ме



108419

1952 г.

ВВЕДЕНИЕ

Сыпучие смеси являются объектом технологических и транспортных операций в самых различных отраслях народного хозяйства. Удельный вес сыпучих грузов в народном хозяйстве нашей страны огромен. Только железнодорожный транспорт Советского Союза в своем грузообороте имеет:

Угля и кокса	— 32,0%
Минеральных стройматериалов (песок, щебень и проч. сып. мат.)	— 17,8%
Хлебных грузов	— 4,8%
Руды	— 5,4%

Итого сыпучие грузы составляют — 60%*) всего грузооборота железнодорожного транспорта нашей страны.

Такие предприятия, как мукомольные и элеваторные, обогатительные, цементные и др., целиком заняты операциями по переработке и перемещению огромных масс сыпучего груза.

Разработка конструкций хранилищ и машин для переработки сыпучих смесей тесно связана с состоянием науки, рассматривающей вопросы механики сыпучей смеси.

Статика сыпучей смеси, в приложении к строительному искусству, разработана сравнительно полно. Что же касается кинематики и динамики, то таких разделов в механике сыпучих смесей еще нет.

Такие вопросы, как законы движения сыпучих смесей при их истечении из сосудов (кинематика сыпучей смеси), законы распределения давлений на элементы сосудов, содержащих движущуюся сыпучую смесь (динамика сыпучей смеси), остаются пока неразрешенными.

Вопросы автоматизации технологического процесса переработки, а также перемещения сыпучих грузов должны решаться с учетом их физических свойств.

*) Г. П. Гриневич. Механизация погрузочно-разгрузочных работ и склады на железнодорожном транспорте. Трансжелдориздат, 1950 г.

Такие актуальные проблемы как:

а) конструирование и монтаж сигнальных устройств внутри силосов (температурная и объемная сигнализация);

б) определение давлений на элементы жолобов и рабочих органов конвейера сплошного волочения, а также их зависимость от физических свойств сыпучей смеси и кинематических параметров этой смеси;

в) конструирование поплавков автоматического отвала валков в вальцевых станках мукомольных мельниц;

г) определение давлений на элементы сосудов (шахт и бункеров), содержащих сыпучую смесь, не могут быть решенными с достаточной полнотой, вследствие отсутствия данных по динамике сыпучих смесей.

Великий преобразователь природы И. В. Мичурин писал: «Мы не можем ждать милостей от природы, взять их у нее — наша задача».

Автоматизировать потоки сыпучей смеси на основании использования свойств потока — значит использовать силы природы на службу человеку. Это возможно сделать только при знании сущности физических явлений, происходящих в потоках сыпучей смеси. Только овладев этими знаниями, мы сможем управлять явлениями, происходящими в движущемся массиве сыпучей смеси, и использовать их в необходимом направлении.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Давления сыпучей смеси на элементы сосудов, содержащих эти смеси, были объектом исследования, начиная с 1882 г. (И. Р. Робертс).

Русские инженеры Фрид М. (1890 г.) и Делаacroа А. Е. (1894 г.), а также более поздние иностранные исследователи: Г. А. Янсен (1895 г.), Пранте (1896 г.), Тольц (1897 г.), Эри (1897 г.) и др. занимались вопросами давлений сыпучей смеси на стены и днища сосудов.

Наибольшей популярностью в расчетной практике пользовалась до настоящего времени теория Янсена и теория Эри, как теории, дававшие наиболее близкие результаты к практически получаемым давлениям на стенки сосудов.

Однако эти теории, просуществовавшие более полувека, не отвечают в настоящее время требованиям расчетной техники.

Конструкции стен сосудов, рассчитанные по теории Янсена, с началом выпуска из них сыпучей смеси разрушаются. Давления на стены сосудов при выпуске из них сыпучей смеси превышают расчетные в несколько раз.

Экспериментальные исследования, проведенные советскими исследователями (С. Герасимовым—1935 г., С. Г. Тахтамышевым и М. И. Хаймовичем—1938—1939 гг., М. С. Бернштейном—1941 г., В. С. Ким—1951 г.), установили несоответствие теории Янсена реальной действительности и высказали предположения о причинах появления повышенных давлений на стены сосудов со стороны сыпучей смеси.

Советские исследователи обратили внимание на наличие двух форм истечения сыпучей смеси из сосудов: всем столбом—без образования воронки на поверхности и частичным столбом—с наличием воронки на поверхности сыпучей смеси (Герасимов С.).

Советскими исследователями (Тахтамышев и Хаймович) установлено полное несоответствие действительного распределения горизонтальных усилий теории Янсена. Впервые была обнаружена связь между давлением на стены сосудов и формой истечения (Тахтамышев, Хаймович, Бернштейн). Обнаружена также связь между плотностью укладки, формой истечения и величиной давления на стены сосуда (Ким).

Таким образом, советские исследователи направили свое внимание на структурное состояние сыпучей смеси, рассчитывая найти здесь ответ на волнующие технику вопросы.

Однако, как показывают результаты самых последних исследований, вопрос динамики сыпучей смеси еще не получил своего окончательного решения.

Критические замечания по проведенным экспериментальным и теоретическим исследованиям

Основным недостатком теорий Янсена и Эри, а также Ренкина, являются не их методические неточности и недоработки, на которые указывают современные исследователи, критикуя эти теории, а их метафизический подход к решению этой важной проблемы.

Метафизичность теорий Янсена и Эри заключается прежде всего в том, что оба исследователя рассматривали сыпучую смесь как простую сумму твердых частиц, как твердое тело, обладающее (у Янсена) способностью оказывать давление на дно и стенки сосуда и сползать как твердый клин по наклонной поверхности (у Эри).

Таким образом, Янсен и Эри приписывали сыпучей смеси в целом свойства того твердого тела, из которого состоят частицы, составляющие данную смесь. Однако сыпучая смесь, по нашему мнению, не есть простая сумма частиц, ибо простые количественные изменения неминуемо должны создать новое

качество. Определением этого нового качества мы и считали необходимым заняться в первую очередь, работая над решением вопросов механики сыпучих тел.

Ошибкой последующих исследователей досоветского периода была попытка внести в теорию Янсена и Эри отдельные поправки методического характера, которые не меняли положения по существу.

Советские исследователи стали на правильный путь, обратив внимание на структурное состояние сыпучей смеси. Указание исследователей ЦНИИПС'а о наличии взаимосвязи между формой истечения и величиной давления намечает путь к дальнейшим исследованиям.

Основным недостатком современных исследований является рассмотрение формы истечения в отрыве от структурного состояния сыпучей смеси. Некоторым исключением являются исследования Бернштейна и Кима (связь формы истечения с плотностью сыпучей смеси).

Таким образом, основной причиной наличия существенных расхождений между теоретическими толкованиями и данными опыта является отсутствие правильной модели сыпучей смеси, которая должна быть положена в основу теоретических изысканий.

Постановка вопроса, рабочая гипотеза

Янсен в 1895 г. высказал мысль, что давление передается не от одного горизонтального слоя к другому, а путем образования в общей массе зерновых сводиков. Эта мысль несколько позже была поддержана Плейснером. Однако далее высказываний дело не пошло. Янсен создал свою теорию, исходя из условий равновесия «твердого» элемента—пластины зернового столба, а Эри исходил из условия равновесия «твердого» клинообразного элемента.

Только русский ученый проф. Протоdjаконов М. М. (1906—1909 гг.) положил в основу своей теории способность сыпучей смеси образовывать над выпускным отверстием свода и предложил особый метод расчета давлений на рудничную крепь.

Факт увеличения давлений на стены и уменьшение давления на дно с началом выпуска сыпучей смеси из сосуда (исследования ЦНИИПС'а) убедили нас в необходимости иного подхода к изучению структурного состояния сыпучей смеси.

Наша рабочая гипотеза сводится к следующим основным положениям:

Сыпучая смесь, будучи засыпана в сосуд, находится в бесструктурном состоянии. Малейшее перемещение сыпучего мас-

сива приводит к немедленному образованию в сыпучей смеси многосводчатой структуры.

Многосводчатая структура сыпучей смеси, раз образовавшись в сыпучем массиве, продолжает существовать в нем непрерывно.

Движение сыпучего массива до определенного значения скорости не нарушает многосводчатой структуры сыпучей смеси.

Скорости движения сыпучей смеси, при которых сохраняется сводчатая структура, соответствуют *связанному движению*, т. е. движению, при котором действуют связи, наложенные силами внутреннего трения.

Сводчатая структура разрушается с переходом движущегося массива сыпучей смеси в область несвязанного движения—движения с нарушением связей, накладываемых силами внутреннего трения. Относительная подвижность у частиц при этом увеличивается.

Таким образом, в нашей рабочей гипотезе высказаны соображения, согласно которым сыпучую смесь нельзя рассматривать как механическую сумму твердых частиц, нельзя рассматривать как твердое тело, обладающее всеми свойствами твердого тела, из которого состоят частицы сыпучей смеси.

Механическое изменение количества частиц твердого тела приводит к созданию нового качества сыпучей смеси, не обладающей свойствами того твердого тела, из частиц которого эта сыпучая смесь состоит.

Сыпучую смесь нужно, таким образом, рассматривать, как новое качество, которому присущи новые свойства, и главное из них—стремление к созданию многосводчатой структуры.

Экспериментальное подтверждение нашей рабочей гипотезы дает возможность объяснить ряд явлений, оставшихся до сих пор не исследованными.

К этим явлениям, прежде всего, относятся:

1. Увеличение давлений на стены и уменьшение давлений на дно сосудов с началом выпуска из них сыпучей смеси.
2. Причина «пульсации» боковых давлений.
3. Наличие двух форм истечения сыпучей смеси из сосудов.
4. Связь формы истечения сыпучей смеси из сосуда с величиной давления на стены и др.

Экспериментальная база и методика исследования

Исследования производились в лабораторных условиях. Сосуды представляли из себя шахты прямоугольного сечения с размерами в плане 220×220 мм и др.

Для измерения вертикальных давлений применялись электромагнитные датчики, а для горизонтальных давлений — индукционные датчики. Показания датчиков записывались на пленку осциллографа. Исследования сыпучего зернового столба делились на три основных этапа:

- а) исследования в области статики;
- б) исследования в области кинематики и
- в) исследования в области динамики.

1. *Исследования в области статики* ставили своей целью проверить правильность основного положения рабочей гипотезы об образовании структурных сводов в массе сыпучей зерновой смеси.

Для этой цели производились исследования по определению зависимости давлений на дно шахты от изменения высоты слоя (разгружающая способность стен), а также характера изменения давлений на дно с перемещением последнего.

Для изучения природы структурных сводов в столб сыпучей смеси вводились:

а) тонкие пластины для горизонтального рассечения структурных сводов по высоте столба и

б) контуры с параллельными, горизонтальными прутьями для расчленения структурных сводов по вертикали.

2. *Исследования в области кинематики* зернового столба ставили своей целью проверить наличие структурных сводов в движущемся зерновом столбе, объяснить причины существования двух форм движения зернового столба при истечении из сосудов и определить связь между структурой зернового столба и формой движения его.

Для этой цели велись наблюдения над изменением формы движения зернового столба в зависимости от величины внутренних и внешних углов трения, в зависимости от геометрических размеров сосуда и зернового столба, а также в зависимости от скорости движения.

При исследовании влияния на форму движения углов внутреннего трения изменялся подопытный материал (рожь, чумиза-зерно, чумиза-крупка).

При исследовании влияния угла внешнего трения на кинематику зернового столба, изменялся материал стен (стены фанеровались, облицовывались стеклом либо проволоочной сеткой).

При исследовании влияния геометрических факторов шахты, изменялись размеры поперечника шахты и размеры отверстия в днище.

При исследовании влияния характера движения зернового столба скорость регулировалась величиной живого сечения специального затвора типа жалюзи, помещенного ниже выпускного отверстия шахты. Это давало возможность регулировать скорость движения зернового столба независимо от размеров выпускного отверстия шахты.

3. *Исследования в области динамики зернового столба* ставили своей целью проверить правильность положений рабочей гипотезы о распределении усилий в движущейся сыпучей смеси в связи с наличием в ней структурных сводов.

Для этой цели было исследовано:

а) влияние высоты слоя движущейся сыпучей смеси и ее кинематических факторов на величину *вертикальных давлений* (на контур в зерновом столбе);

б) влияние дополнительных контуров в шахте на величину давления на основной контур с целью определения: величины оптимального шага контуров в столбе сыпучей смеси и зон пульсации структурных сводов в процессе движения зернового столба.

Для проверки правильности положений рабочей гипотезы о характере распределения усилий в сыпучей смеси, имеющей сплошную сводчатую структуру, были проведены исследования влияния на *горизонтальные давления* высоты слоя неподвижного и движущегося зернового столба и его кинематических параметров.

Для доказательства существования структурных сводов в зерновом столбе в процессе его движения проведены также исследования горизонтальных давлений со стороны движущегося снизу вверх зернового столба (проволакивание вдоль жолоба). Для этой цели зерновой столб перемещался внутри шахты снизу вверх при помощи подвижного (внутри шахты) днища с различными скоростями. Такие исследования проведены также для трех видов подопытного материала (рожь, чумиза-крупка и чумиза-зерно), со значительно отличающимися углами внутреннего трения.

Результаты исследований и выводы

1. Исследования, проведенные в области статики зернового столба показали:

а) Давление на дно шахты, в процессе наполнений ее зерном, возрастает по затухающей кривой по мере увеличения слоя засыпки.

б) Давление на дно шахты при перемещении его вниз на сотые доли миллиметра, резко снижается (при смещении дна на 0,25 мм давление снизилось на 22%).

в) С введением в зерновой столб горизонтально расположенного контура, связанного со стенами шахты и состоящего из параллельно расположенных прутьев, давление на дно шахты также уменьшается.

г) С введением в зерновой столб тонких пластин, горизонтально расположенных и не связанных со стенами шахты, давление на дно увеличивается при незначительных перемещениях его.

Полученные результаты доказывают справедливость принятой гипотезы в отношении образования в столбе сыпучей смеси, с появлением незначительных перемещений, сплошной сводчатой структуры.

Первая группа опытов (а) указывает на разгружающую способность стен, которая увеличивается с увеличением слоя засыпки.

Вторая группа опытов (б) доказывает, что при незначительных перемещениях столба сыпучей смеси, в нем немедленно образовывались структурные своды. Структурные своды, являющиеся совокупностью частиц сыпучей смеси, обладающих одинаковой степенью плотности укладки (одинаково напряженные частицы), воспринимая вертикальные давления от вышележащих слоев, передают значительную часть этих давлений стенам (основаниям сводов). Здесь следует ожидать резкое увеличение горизонтальных давлений на стены шахты.

Третья группа опытов (в) доказала, что структурный свод в столбе зерновой сыпучей смеси, расчлененный по вертикали на несколько сводов, опирающихся на стержни (прутья) контура, уменьшает давление на дно шахты.

Подтверждение опытами этих предположений еще раз доказало справедливость принятой гипотезы.

Четвертая группа опытов (г) указывает, что если структурным сводам в столбе сыпучей смеси тем или иным образом не дать замкнуться, то в столбе сыпучей смеси сводчатая структура не будет иметь места—давление на дно увеличится. Подтверждение наших предположений результатами опыта говорит о справедливости этой части рабочей гипотезы.

Полагая, таким образом, доказанным наличие сплошной сводчатой структуры в столбе сыпучей смеси и приняв доказательства проф. М. М. Протодяконова о параболической форме сводов, нами приведен способ расчета размеров сводов с учетом их свойств.

Наряду с этим установлено, что структурный свод, по своему характеру будучи недостаточно жестким, передает часть давления от вышележащих слоев на под'арочный объем (в силу податливости свода). Устойчивость и податливость сво-

дов, при расчете вертикальных давлений, нами предложено учитывать соответствующим «коэффициентом устойчивости свода», который может быть определен в зависимости от высоты слоя засыпки (приводятся таблицы и графики).

2. Исследования в области кинематики зернового столба показали:

а) Наблюдаются две формы движения сыпучей зерновой смеси в процессе истечения из сосуда, шахты и пр.: всем столбом, без наличия воронкообразного углубления на поверхности столба сыпучей смеси и частичным столбом, с наличием воронкообразного углубления на поверхности зернового столба.

б) Первая форма движения, как правило, переходит во вторую форму движения. Момент такого перехода, характеризуемый высотой слоя засыпки „ H_0 “ зависит, при равных скоростных параметрах, от размера поперечника шахты и от внутреннего и внешнего углов трения.

С изменением поперечника шахты „ a “, $H_0 = f(a)$ остается неизменной при постоянных μ и μ' .

С увеличением угла внутреннего трения „ H_0 “ уменьшается с увеличением угла внешнего трения „ H_0 “ увеличивается.

Переход из одной формы движения в другую не зависит от размеров отверстия (если последнее не влияет на величину скорости движения).

в) Над отверстием шахты, при выпуске из нее сыпучей смеси, образуется динамический свод, ограничивающий зону свободного выпадения частиц.

Высота динамического свода, как показали опыты, зависит от скорости движения зернового столба в шахте и от величины слоя засыпки над динамическим сводом. (В работе приведена графическая зависимость $A_0 = f_1(v)$).

г) Величина угла внутреннего трения, определявшегося углом поверхности неподвижных зерновых призм, у выпускного отверстия, к горизонту, уменьшается с увеличением скорости движения зернового столба. В работе приведена зависимость $\mu = f_3(v)$.

Таким образом, изложенные результаты опытов показали полное соответствие нашим предположениям, высказанным в рабочей гипотезе.

Исследования показали, что движение сыпучей смеси в шахте нужно рассматривать как *связанное движение*—движение с наложенными силами внутреннего трения связями, т. е. движение столба сыпучей смеси без относительного движения частиц, при котором сохраняется сводчатая структура зернового столба и как *несвязанное движение*—движение столба

сыпучей смеси с потерей внутреннего равновесия, т. е. с наличием относительного движения частиц сыпучей смеси с их повышенной подвижностью, что создает условия для разрушения сводчатой структуры.

Каждому виду движения, при истечении сыпучей смеси из сосуда, свойственна своя форма истечения.

Связанному движению (при наличии сводчатой структуры) свойственно истечение всем столбом, без наличия воронки на его поверхности. При этом горизонтальные давления увеличиваются, что и отмечается многими исследователями (Тахтамышев, Бернштейн, Ким и др.).

Несвязанному виду движения (при отсутствии сводчатой структуры) свойственно истечение частичным столбом, с наличием воронки на его поверхности. При этом горизонтальные давления не увеличиваются (что и отмечается теми же исследователями).

Переход от одной формы движения сыпучей смеси к другой, при связанном движении, объясняется ослаблением прочности структурных сводов из-за уменьшения слоя засыпки над сводами и их полным раскрытием. Раскрытие сводов приводит к свободному истечению (воронкой).

3. Исследования в области динамики зернового столба проводились путем изучения характера изменений вертикальных и горизонтальных давлений, в зависимости от ряда факторов.

При изучении вертикальных давлений со стороны движущегося зернового столба установлено:

а) Давление на контур в движущемся зерновом столбе, с увеличением слоя засыпки над ним, возрастает по затухающей кривой и имеет тенденцию приближаться к постоянной величине при достижении слоем засыпки $H \simeq 3,5 a$ (a — поперечник шахты).

Величина давления на контур может быть определена по формуле:

$$P_k = K \xi_0 (1 - e^{-ch}),$$

где: $K = \frac{\gamma \cdot S^2}{\mu n L}$ h — высота слоя засыпки над контуром;

γ — насыпной вес $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$;

$C = \frac{\mu n L}{S}$ S — площадь шахты в плане;

$$\xi_0 = \frac{P_k}{S_c}; L — \text{периметр шахты};$$

μ — коэффициент внутреннего трения;

$$n = \operatorname{tg}^2(45 - \frac{\varphi}{2});$$

P_c — вертикальное давление в плоскости контура.

Коэффициент ξ_0 — коэффициент восприятия контура определен эмпирически (приведены таблицы) и не превышает значений 0,7 — 0,86.

При введении в шахту дополнительных контуров, на некотором расстоянии « t » от основного контура, давление на последний снижалось и характеризовалось тоже плавной кривой, переходящей в прямую линию, параллельную оси абсцисс (оси H), давление оставалось постоянным с увеличением h_g (слоя засыпки над дополнительным контуром).

Давление на основной контур (О. К.) при установке над ним на расстоянии « t » дополнительного контура (Д. К.) определяется формулой:

$$P_{ок} = \xi_0 \cdot K \left\{ 1 - \left[1 - (1 - \xi_g)(1 - e^{-ch_g}) \right] e^{-ct} \right\}.$$

Здесь: ξ_0 и ξ_g — коэффициенты восприятия основного и дополнительного контуров соответственно; t и h_g — высота материала над основным и дополнительным контурами.

Значение ξ_g определялось из опыта. Найдена также аналитическая зависимость $\xi_g = f'(h_g; t)$, а именно:

$$\xi_g = (1 - e^{-dth_g})(1 - e^{-bh_g^{0.4}}),$$

где: d и b — постоянные коэффициенты;

$$d = 0,011; b = 0,412.$$

При установке в шахту дополнительных контуров, на кривой давлений отмечался момент „ H_k “ закрытия структурных сводов, это дало возможность определить зоны «пульсации» структурных сводов и определить оптимальные размеры шага расположения контуров в шахте.

б) Оптимальное расположение контуров по высоте шахты связано с зоной «пульсации» структурного свода.

Для ржи зона пульсации определена в пределах $H_k = (1 \div 2) a$, где a — поперечник шахты.

Таким образом, установлено, что наиболее рациональным шагом размещения контуров в шахте с движущимся зерно-

вым столбом является $t \cong 1,5 a$. Такое размещение признано оптимальным для всех скоростей, при которых производились исследования со связанным движением ($v = 0,01, 0,02$ и $0,033$ м/сек).

г) Исследования влияния кинематических параметров показали, что при движении зернового столба со скоростью от $v = 0$ до $v = 0,015$ м/сек давление на контур увеличивается.

Увеличение скорости $v = 0,015 \div 0,020$ м/сек не дает роста давления, и с увеличением скорости $v > 0,02$ м/сек наблюдается уменьшение давления на контур.

Эта группа опытов позволяет сделать следующий вывод: структурные своды продолжают существовать в связанном движущемся зерновом столбе.

Динамичность процесса выражается, главным образом, в «пульсации» структурных сводов.

Явление «пульсации» структурных сводов дает ответ на вопрос о причинах пульсации горизонтальных давлений, поставленный рядом исследователей (Тахтамышев, Бернштейн и др.).

Скорость движения зернового столба является основным фактором, определяющим прочность структурных сводов:

пределы $v = 0 \div 0,015$ м/сек являются пределами скоростей, при которых происходит формирование структурных сводов;

пределы $v = 0,015 \div 0,020$ м/сек — предел наибольшей устойчивости структурных сводов и $v > 0,02$ м/сек — период перехода к несвязанному движению, при котором происходит ослабление связей между частицами и разрушение структурных сводов и, как следствие, уменьшение горизонтальных давлений.

При изучении горизонтальных давлений со стороны движущегося зернового столба установлен:

а) В момент начала движения зернового столба горизонтальное давление резко увеличивается и достигает своего максимума, превышающего первоначальное давление в 1,7 раза.

б) С увеличением скорости $v = 0 \div 0,015$ м/сек горизонтальное давление увеличивается, дальнейшее увеличение скорости в пределах $v = 0,015$ до $0,020$ м/сек не приводит к росту давления и при увеличении скорости $v > 0,02$ м/сек наблюдается сравнительно быстрое снижение горизонтального давления. (В работе приведены графическая и аналитическая зависимости горизонтального давления от скорости движения зернового столба).

Горизонтальное давление со стороны движущегося зернового столба может быть определено по формуле:

$$P_r = \frac{\gamma S}{\mu L} \left(1 - e^{-cn \frac{\mu L}{S} h} \right) \left(10e^{-24,7v} - 7,63e^{-47,1v} - 1,37 \right),$$

где:

$$cn = 0,5;$$

$$n = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right).$$

Таким образом, группа опытов, направленная на изучение горизонтальных давлений со стороны движущегося зернового столба еще раз доказала справедливость положения рабочей гипотезы о существовании структурных сводов в движущемся столбе сыпучей зерновой смеси.

Эта группа опытов доказала зависимость устойчивости сплошной сводчатой структуры в зерновом столбе от кинематических параметров движущегося столба.

Момент начала движения зернового столба характеризуется формированием структурных сводов, а стало быть и ростом горизонтальных давлений.

Пределы скоростей $v = 0,015 \div 0,02$ м/сек являются пределами наибольшей устойчивости структурных сводов. Скорости $v > 0,02$ м/сек характерны ослаблением связей, накладываемых силами трения; при этом частицы приобретают повышенную относительную подвижность, структурные своды рушатся, и при скорости $v > 0,05$ м/сек зерновой поток не имеет структурных сводов. Горизонтальные давления при этом снижаются, наблюдается переход к свободному истечению сыпучей смеси по всей высоте шахты.

Изложенные выше результаты исследований в области динамики столба сыпучей зерновой смеси относились к движению его под влиянием сил тяжести, т. е. исследовались активные давления сыпучей смеси.

Поскольку наша рабочая гипотеза не делает исключений для движения сыпучей смеси под влиянием внешнедействующих усилий, то исследованию подверглись и горизонтальные давления со стороны движущегося снизу вверх зернового столба (пассивные давления).

Эти исследования показали:

а) Точка приложения максимального горизонтального давления на стенки шахты по высоте для различных сыпучих смесей различна, т. е. ее местоположение зависит от физических свойств сыпучей смеси. С уменьшением угла внутренне-

го трения точка приложения максимального горизонтального давления подымается выше.

б) С увеличением скорости движения горизонтальные давления, со стороны сыпучих смесей, имеющих сравнительно большой угол внешнего трения, уменьшаются (при изменении $v=0,04$ до $0,2$ м/сек давление снизилось на 40%). У материалов с малым углом внешнего трения изменение скоростей движения не приводит к значительным изменениям горизонтальных давлений.

Таким образом, результаты указанных исследований показали, что и в сыпучей смеси, получившей движение от внешних усилий, образуется многосводчатая структура.

Расстояние от основания зернового столба к точке приложения максимального горизонтального усилия характеризует собой высоту структурного свода, который находится в зависимости от угла внутреннего трения сыпучей смеси.

Поскольку кинематические параметры, в данном способе перемещения столба сыпучей смеси, не нарушают внутренней структуры ее, то можно предполагать, что изменения горизонтальных давлений в связи с этим, не могут иметь места за исключением сыпучих смесей, у которых угол внешнего трения сравнительно велик, и увеличение скорости волочения зернового столба (как единого целого) уменьшает силу трения его о стенки жолоба, что сказывается на величине горизонтальных давлений в сторону их уменьшения.

