

DOI: 10.12737/article\_590878fb1ef922.54780407

Герасимов М.Д., канд. техн. наук, доц.,  
Горшков П.С., канд. техн. наук, доцент,  
Бражник Ю.В., старший преподаватель  
Грудина В.А., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВАРИАЦИЙ НАСАДОК (СОПЕЛ) ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОГО 3D ПРИНТЕРА\*

mail\_mihail@mail.ru

*Интенсивное развитие аддитивных технологий в целом ряде отраслей промышленности вызвало необходимость реализации подобных проектов в строительстве. На рынке строительной техники широко рекламируются установки для производства строительных работ и изготовления целого ряда строительных изделий. Следует отметить, что в настоящее время во многих научно-исследовательских центрах ведётся целый комплекс работ по отработке оптимальных составов строительной смеси, смесительного и формующего оборудования, средств автоматизации и управления для получения строительных трёхмерных моделей. Известно, что в смежных отраслях промышленности, таких как медицина, производство компьютерного оборудования, накоплен некоторый опыт, который может быть использован в аддитивных технологиях строительного производства. Анализ и критическая оценка существующих инструментов в смежных отраслях может существенно сократить объём и время научных исследований по внедрению аддитивных технологий в строительстве.*

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, строительное производство, шнековый нагнетатель, формующая головка, сопло, реологическая модель, эффективная вязкость.

Интенсивное развитие аддитивных технологий приводит к тому, что существенно меняются взгляды и на технологию изготовления как некоторых строительных изделий, так и строительных технологий в целом. На рынке строительной индустрии появляется [1, 2 и др.] целый ряд предложений по созданию и реализации строительных 3D принтеров. Данное направление в строительстве сегодня наращивает опыт создания и производства такого оборудования.

Следует отметить, что часть рабочих узлов 3D принтеров, в том или ином виде, используется в смежных отраслях промышленности. Если 3D принтер рассматривать как «печатающую руку в строительстве», для удобства назовём такое устройство – PERST, то оно в общем случае состоит из нескольких основных узлов и систем: рама; узел приготовления строительной смеси; система подачи, строительной смеси; формующий узел; система автоматического управления и система интеллектуального обеспечения. В качестве формующего инструмента, прежде всего, может быть рассмотрено - сопло.

### 1. Обзор областей техники, использующих инструмент – сопло.

Сопло - канал переменного поперечного сечения, предназначенный для разгона жидко-

стей или газов до определённой скорости и придания потоку требуемого направления [3]. Принцип действия сопла основан на непрерывном увеличении скорости жидкости или газа в направлении течения от входного до выходного сечения. Для обеспечения течения жидкости (газа) необходим перепад давления с превышением его на входном сечении.

В частном случае, сопло представляет собой канал, суженный в середине.

Отличительной особенностью сопла является: назначение (для разгона жидкости, газов и газо-твёрдой смеси); форма канала (специальный профиль, сопло Лавалья, сопло Вентури); резкое изменение по длине сопла скорости потока ( $v$ ) и давления ( $p$ ).

1.1. Сопло Лавалья – газовый канал особого профиля, разгоняющий проходящий по нему газовый поток до сверхзвуковых скоростей, рис. 1.

Ни одно из конструктивных особенностей сопла Лавалья использовать в системе ПЕРСТ не имеет смысла, так как в данной системе бесконечно малые скорости движения потока в сравнении со скоростями в сопле Лавалья. Однако, характер поведения давления в любом виде формующего звена системы ПЕРСТ



личных изделий и материалов. Пескоструйной обработке подвергают такие материалы как металл, дерево, керамические материалы и многие другие. Среди объектов пескоструйной обработки: днища судов, трубопроводы, цистерны и ме-



Рис. 4. Сопла BLVW-6 (9,5 мм). Материал – Карбид бора. Ресурс (ч) – 1000

таллические ёмкости, кирпичные кладки стен, деревянные конструкции зданий и сооружений.

Рассмотрим конструкции отдельных представителей таких сопел [5], которые являются расходным материалом.



Рис. 5. BS435-8 (12,5 мм). Материал – Карбид бора. Ресурс (ч) – 1000



Рис. 6. Инструменты ООО «Группа Компаний «ТехноСпецСнаб»



Рис. 7. Сопла Вентури из карбида вольфрама серии СТС

Срок службы - до 400 часов; оболочка – алюминий; резьба – 50 мм Входной диаметр – 32 мм. Диаметр и длина сопла, мм: 6.5×130; 8.0×150; 9.5×170; 11.0×200; 12.5×210.



Рис. 8. Сопла Вентури из карбида вольфрама серии МТС. Срок службы – до 400 часов; оболочка – алюминий; резьба – 50 мм, входной диаметр – 25 мм. Диаметр и длина сопла, мм: 5.0×80; 6.5×80; 8.0×80; 9.5×80; 11.0×80; 12.5 ×80



Рис. 9. Сопла для трубной очистки серии RTC 360° из карбида вольфрама, срок службы – до 400 часов, оболочка – алюминий. Резьба – 50 мм. Входной диаметр – 32 мм. Диаметр и длина сопла: 8.0×75 мм

В комплект инструментов пескоструйных установок входят также соплодержатели и крабовые сцепления.

## 2. Обзор формулирующего оборудования экструзионных машин

Производство полимерных материалов получило широкое распространение в отечествен-

ной и зарубежной промышленности. Основы теории экструзионных процессов были заложены в первой четверти 20 века. Теорию экструзионных процессов формировали такие учёные, как: Э.П. Бернхард, М. Рейнер, В. Филлипоф и другие.

Экструзия - метод формования в экструдере изделий или полуфабрикатов неограниченной длины продавливанием расплава полимера через формующую головку с каналами необходимого профиля [14]. Для этого используют шнековые или червячные экструдеры.

Наиболее простым является одношнековый экструдер без зоны дегазации (рис. 10). Основ-

ными элементами экструдера являются обогреваемый цилиндр, шнек (с охлаждением или без него), сетки, размещаемые на решетке, и формующая головка. В зависимости от природы полимера, технологических режимов переработки применяются шнеки различного профиля, в частности с различным характером изменения глубины  $h$  нарезки по длине шнека.

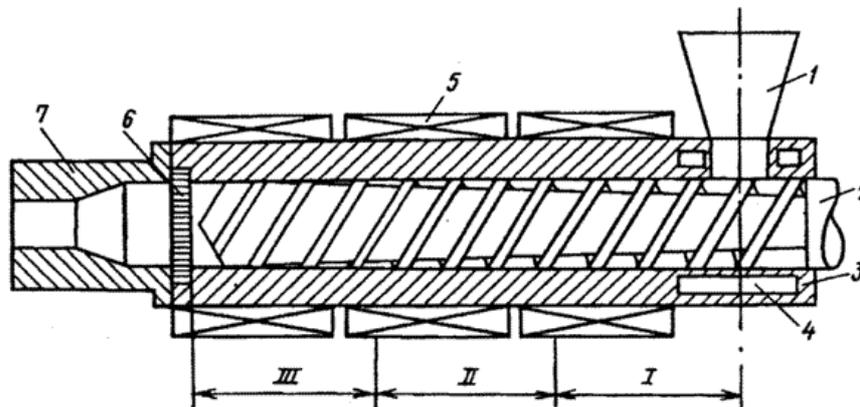


Рис. 10. Схема одношнекового экструдера: 1 – бункер; 2 – шнек; 3 – цилиндр; 4 – полость для циркуляции воды; 5 – нагреватель; 6 – решетка с сетками; 7 – формующая головка; I, II, III – технологические зоны [5]

В зависимости от вида выпускаемого изделия применяют либо коротко-, либо длинношнековые машины, т. е. с малым или большим отношением длины  $L$  к диаметру  $D$  шнека ( $L/D$ ). Значения  $D$  и  $L/D$  являются основными характеристиками одношнекового экструдера. Параметрический ряд отечественных экструдеров построен по диаметрам шнека:  $D = 20; 32; 45; 63; 90; 125; 160; 200; 250; 320$  мм. В наименовании типоразмера пресса указываются  $D$  и  $L/D$ . Например, ЧП-45х20 означает следующее: ЧП-червячный пресс,  $D = 45$  мм,  $L/D = 20$ .

Несмотря на простоту схемы формующей головки на рис. 10, в практике проектирования и создания экструдеров, данный узел представляет собой сложное техническое решение и носит узкий, специализированный характер. Однако, шнековая часть экструдера представляет собой узел, универсальный для многих машин и его рассмотрение может быть полезным для системы PERST.

Важной особенностью экструдеров является зависимость производительности шнековой и формующей части от давления прессования, рис. 11.

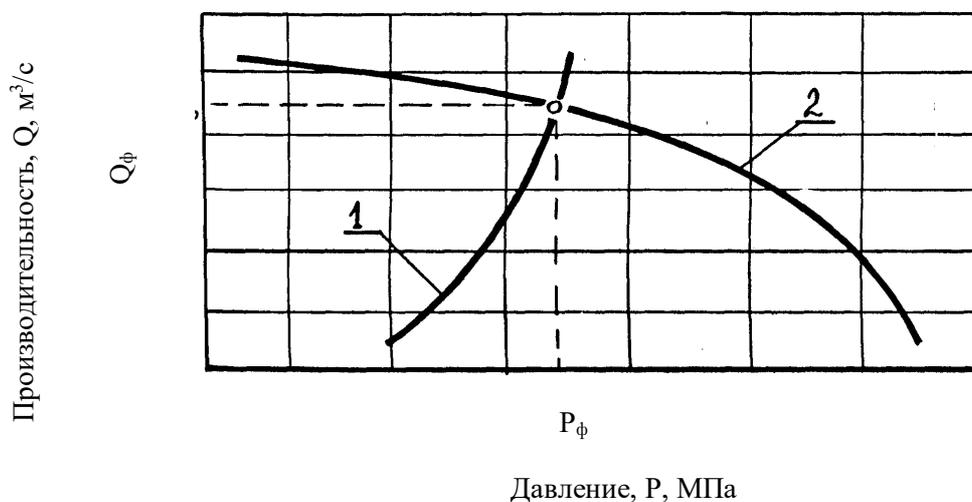


Рис. 11. Определение фактической производительности ( $Q_{\phi}$ ) и давления ( $P_{\phi}$ ) по характеристикам шнека (1) и формующей головки (2) [7]

Из рис. 11 видно, что с ростом давления производительность головки растёт, а производительность шнеков – падает. Причём, шнек 1 подвержен меньшему влиянию давления, чем шнек 2.

Из приведенной информации видно, что формующая часть экструдера не может служить аналогом построения формующей части системы PERST. Однако, вопросы, относящиеся к шнековому нагнетателю, такие как соотношение диаметра и длины, изменение шага и глубины канала по длине и др., в полной мере могут учитываться при разработке шнековой части системы PERST.

### 3. Анализ оборудования керамического производства

Как показывает анализ оборудования для строительных 3D принтеров, в конструкции подающего материала механизма, как правило, присутствует шнековый и формующий рабочий орган. Причём, формующий механизм состоит из

корпуса, внутри которого находится канал течения строительного материала. Поэтому, наиболее близкими по конструктивным признакам, для создания рабочего оборудования системы PERST могут являться аналоги из керамического производства.

#### 3.1 Шнековый нагнетатель

Шнековый нагнетатель – довольно распространённый и изученный механизм. Существуют одношнековые и двухшнековые нагнетатели, с постоянным и переменным шагом винтовой поверхности, с постоянным и переменным объёмом межвиткового пространства. Однако, при большом разнообразии конструкций шнека следует обратить внимание на соотношение величины противодействия на участке транспортирования, расположенной за шнеком, и производительностью шнекового нагнетателя. Известно [8, 9], что наибольшее давление в шнековом механизме расположено в плоскости выпорной (конечной) лопасти.

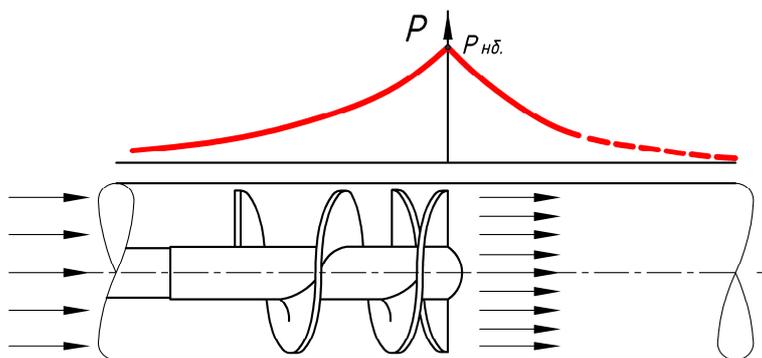


Рис. 12. Схема распределения давления в шнековом механизме

По всей длине шнека давление при работе шнека повышается от 0 до  $P_{нб.}$ . Величина этого давления определяется с одной стороны нагнетательной способностью шнека, т.е. его геометрическими параметрами, а с другой стороны – сопротивлением формующей части. Если взять три шнека разной конструкции, например Ш<sub>1</sub>, Ш<sub>2</sub>, Ш<sub>3</sub>, то можно получить три разных процес-

са, что достаточно хорошо иллюстрируется графиками зависимости производительности и давления в механизме, рис. 13. Очевидно, что с увеличением противодействия производительность шнекового нагнетателя снижается. С другой стороны, в формующей части  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  шнекового нагнетателя при увеличении давления  $P_{нб.}$  производительность растёт.

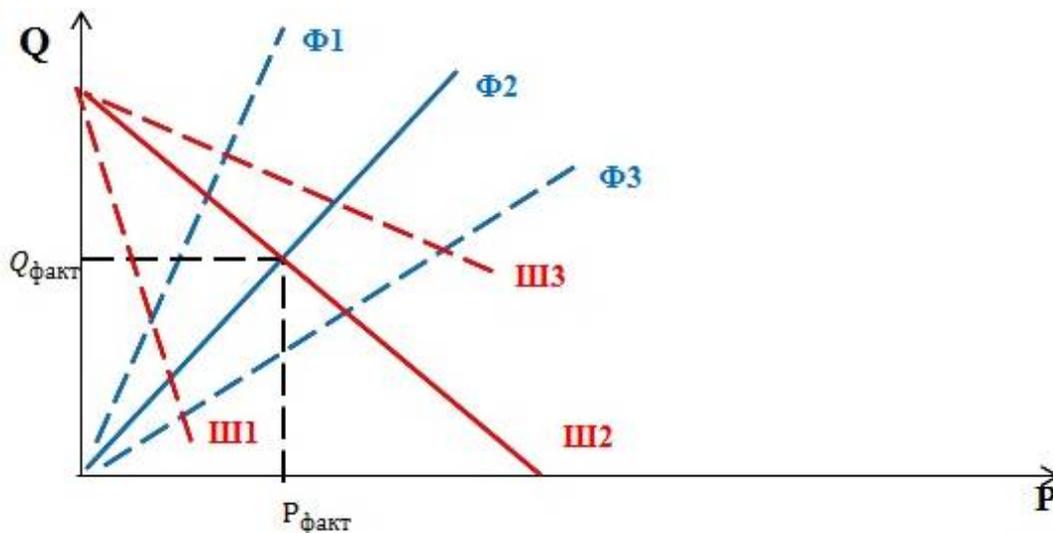


Рис. 13. Характеристики шнековой и формующей части шнекового нагнетателя

Для каждой пары «шнек - формующая головка» имеется фактическая производительность  $Q_{факт}$  и фактическое давление  $P_{факт}$ , которые определяются точкой пересечения их характеристик. Видно, что точкой пересечения характеристик системы «шнек - формующая головка» можно управлять посредством их конструктивных параметров.

Особым случаем работы шнекового нагнетателя может стать его использование в системе

PERST, когда расстояние транспортирования строительной смеси становится значительным, порядка нескольких метров. Сопротивление в формующей части дополняется сопротивлением подающего шланга. Такие условия работы шнекового нагнетателя могут привести к необходимости установки дополнительного шнекового нагнетателя на выходе строительной смеси из шланга, рис. 14.

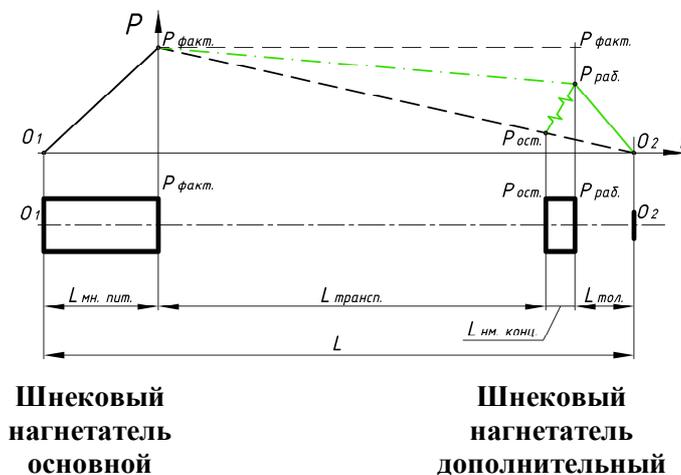


Рис. 14. Схема установки дополнительного шнекового нагнетателя

На длине подачи материала  $L$  имеем несколько участков: участок питающего шнека, участок транспортирования смеси, участок концевой шнека и участок формующей головки. Величина давления, которое развивает шнек составляет  $P_{факт}$ . По мере продвижения смеси к выходному отверстию давление в системе снижается. Без концевой шнека давление снижается по линии « $P_{факт} - O_2$ ». При наличии концевой шнека остаточное давление  $P_{ост}$  можно повысить до необходимого -  $P_{раб}$ , которое может составлять 0,7...0,9 от наибольшего давления. Таким

образом, можно разделить функции основного шнекового нагнетателя – на транспортирование, а концевой – на формование.

### 3.2 Формующая часть – прессовая головка

Прессовая часть ленточного шнекового пресса для производства керамического кирпича состоит из прессовой головки и мундштука. Прессовая головка имеет канал с круглым входным и прямоугольным выходным отверстием. Мундштук имеет канал в виде призмы с прямоугольными отверстиями на входе и выходе.

При проектировании прессовой головки для системы PERST помимо конструктивных параметров: длина, соотношение входной и выходной площади, форма образующих канала, существенную роль будет играть вид и свойства формуемой строительной смеси.

#### 4. Управление реологическими свойствами строительных смесей для системы PERST

Во всех отраслях промышленности, занимающихся переработкой вязкоупругих, вязкопластичных, упруго-пластичных и вязко-упруго-пластичных материалов, используют механизмы для определения и управления реологическими свойствами и реологическими характеристиками перерабатываемых материалов [10, 11, 12, 13]. В разных научных школах могут пользоваться разными реологическими характеристиками и методами их определения. Число реологических характеристик, которыми пользуются специалисты в разных отраслях промышленности более двух десятков [8]. Поэтому, количество реологических параметров строительных смесей желательнее сократить до минимума и обеспечить сходимость, воспроизводимость результатов исследований и возможность использовать в расчёте при проектировании узлов вновь создаваемых машин.

Для описания поведения ньютоновской жидкости уравнение напряжения сдвига от градиента скорости записывается в виде

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\frac{du}{dy}$  – градиент скорости, с<sup>-1</sup>.

Уравнение Шведова – Бингама, которое показывает, что течение пластических жидкостей наступает не сразу, а только после достижения определённого значения напряжения сдвига  $\tau_0$ .

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad (2)$$

При напряжении сдвига  $\tau < \tau_0$  эти вещества ведут себя как упругие тела.

Дальнейшее изучение пластических керамических масс показало, что их поведение при деформациях в действительности имеет еще более сложный характер, чем это следует из уравнения (2). Это связано с так называемым явлением аномалии вязкости. Сущность этого явления состоит в том, что после достижения предельного напряжения сдвига вязкость не остается величиной постоянной, а изменяется с ростом градиента скорости и зависит, в свою очередь, от напряжения сдвига и градиента скорости. Вязкость материалов, зависящая от градиента ско-

рости и напряжения сдвига, получила название "эффективной вязкости".

Реологическое уравнение течения пластической глины записывается в виде

$$\tau = \tau_0 + \mu_{эф} \frac{du}{dy} \quad (3)$$

Таким образом, при определении параметров глинообрабатывающих машин принято [8,9] подставлять значения вязкости  $\mu_{эф}$ , полученные в зависимости от скоростного режима работы машины, т.е. от градиента скорости.

Такая практика нашла широкое применение в переработке пластмасс при решении аналогичных задач. Полученные таким способом расчетные результаты хорошо совпадают с экспериментальными данными, и точность полученных расчетных уравнений в основном зависит от точности определения реологических характеристик перерабатываемой глиномассы.

Как показали работы [7,8,9,15,16], проведенные под руководством проф., д.т.н. Туренко А.В., МГСУ, с точностью, достаточной для инженерных целей, может быть получена информация о поведении материала в процессе движения, если воспользоваться понятием эффективной /аномальной/ вязкости.

Понятием эффективной вязкости очень удобно пользоваться, так как это дает возможность вместо 20 критериев, описывающих поведение пластических материалов при их деформации, пользоваться практически одним -  $\mu_{эф}$ .

#### 5. Метод построения реологических кривых керамических строительных масс в диапазоне градиентов скоростей работы системы PERST

Наиболее полно реологические свойства керамических масс могут быть описаны реологической кривой течения - графиком зависимости эффективной вязкости / или напряжения сдвига/ от градиента скорости.

Для численного определения реологических параметров высоковязких пластических материалов разработаны различные приборы и методы. Обычно для этой цели применяют капиллярные или ротационные вискозиметры. Однако в силу специфических свойств пластических глин формуемой влажности эти приборы, как правило, оказываются непригодными для реологических исследований. Поэтому была разработана специальная методика для определения реологических показателей таких систем [7,8,16].

5.1 Построение реологических кривых на лабораторных стендах

Построение реологических кривых на лабораторных стендах имеет смысл и цель в том случае когда необходимо получить полную рео-

логическую кривую в широком диапазоне градиентов скоростей используемого оборудования, например, от 0 до 4500 с<sup>-1</sup>. В нашем случае остановимся на градиентах скоростей, которые могут возникать при формовании непрерывной ленты материала, укладываемой в изделие. Теоретические исследования [8,15,16] показали, что изменение величины давления и расхода обрабатываемого материала в конусной головке ленточного пресса пропорциональны изменению вязкости керамической массы и геометрическим параметрам рабочего канала лабораторного стенда.

Для ленточного шнекового пресса с конической головкой, насадкой, эффективная вязкость  $\mu_{эф}$ . (Па·с) определяется по формуле [7,8]:

$$\mu_{эф} = \frac{3\pi D^3 d^3 \Delta P}{128 Q l (D^2 + Dd + d^2)}, \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр канала на входе, м;  $d$  – диаметр канала на выходе, м;  $l$  – длина канала, м;  $\Delta P$  – давление в головке на входе в канал, Н/м<sup>2</sup>;  $Q$  – «расход» материала через канал, м<sup>3</sup>/с.

Градиент скорости составляет:

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dy} = \frac{256Q}{\pi(D+d)^3} \quad (5)$$

На рис. 15 представлен график зависимости вязкости от градиента скорости бескудниковской и кембрийской глин в интервале их формовочной влажности. График получен изложенным методом. График построен в логарифмических координатах, в которых зависимость  $\mu_{эф} - \frac{du}{dy}$  представляет собой прямую линию.

Математическая интерпретация этой графической зависимости описывается степенным уравнением вида [7]:

$$\mu_{эф} = \mu_1 \cdot \left(\frac{du}{dy}\right)^{(\Psi-1)} \quad (6)$$

Две константы  $\mu_1$  и  $\Psi$  – минимально возможное число параметров, которыми можно характеризовать данную зависимость и, следовательно; это уравнение описывает поведение пластичной глины в предварительно простой математической форме. Параметр  $\Psi$  может быть легко найден из графика, так как тангенс угла наклона прямой равен  $(\Psi - 1)$ . С другой стороны, при градиенте скорости равном единице,  $lg \frac{du}{dy} = 0$  и коэффициент  $\mu_1$  определяется по отрезку, отсекаемому прямой на ординате  $\frac{du}{dy} = 1$ . Чем выше вязкость материала, тем выше расположена его прямая на графике.

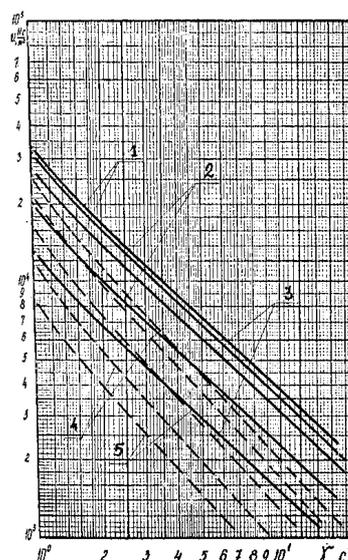


Рис.15. Зависимость эффективной вязкости  $\mu_{эф}$  от градиента скорости  $\dot{\gamma}$  глиномассы Защитинского месторождения влажностью:

1 – 18,75%, 2 – 20,2 %, 3 – 21,7 %, 4 – 22,2%,  
5 – 23,5%, при температуре  $t = 34...35$  °С.

— — — — — коническая насадка,  
- - - - - клиновидная насадка

Таким образом, путем сравнения реологической кривой исследуемой керамической смеси с реологической кривой изученной смеси, можно на основании графика не только качественно оценить деформативные свойства интересующего нас материала, но, принимая во внимание однозначную зависимость усилий, возникающих в узлах глинообрабатывающих машин, от вязкости материала и их геометрических характеристик, графически определить ориентировочную величину основных параметров этих машин, являющихся исходными при их прочностном расчете.

В дальнейшем, когда накопится достаточное количество реологических «кривых течения», пластичные глины можно будет классифицировать по формовочным свойствам в соответствии с величиной коэффициентов  $\mu_1$  и  $\Psi$ . Это еще более упростит расчет оптимальных механических режимов работы оборудования.

Наличие интеллектуального блока в системе PERST, может позволить осуществлять управление аддитивным процессом по реологическим параметрам каждой строительной смеси. Такое условие может быть реализовано в случае, если указанные реологические параметры получать непосредственно на формирующем агрегате системы PERST.

**Вывод.** Аддитивные технологии в строительстве и в производстве строительных изделий является бурно развивающимся направлением в строительной отрасли. Существуют отдельные виды производств, в которых уже ис-

пользуются некоторые результаты научных исследований и конструкции узлов и деталей машин, которые можно и нужно учесть при создании машин с условным названием «печатающая рука строительная - PERST». К таким элементам системы PERST можно отнести конструкции сопла пескоструйных машин, конструкции нагнетательных шнеков, методики определения реологических параметров формовочных смесей.

\* Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы», соглашение № 14.577.21.0193 о предоставлении субсидии от 27 октября 2015 года, тема: «Разработка роботизированного комплекса для реализации полномасштабных аддитивных технологий инновационных материалов, композитов, конструкций и сооружений». Уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57715X0193.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <http://top3dshop.ru/kupit-3d-printer/building/>
2. <http://3dsol-model.ru/oborudovanie/stroitelny-e-3d-printery/>,
3. Политехнический словарь. Гл. ред. И.И. Артоболевский, М., «Советская энциклопедия», 1976. 608 с.
4. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/321107#>.
5. [http://tradeacons.com/magazin/peskostrujnoe\\_oborudovanie/sopla\\_dlja\\_peskostrjnogo\\_apparata](http://tradeacons.com/magazin/peskostrujnoe_oborudovanie/sopla_dlja_peskostrjnogo_apparata)
6. <http://listpp.ru/index.php?id=23>
7. Герасимов М.Д. Разработка формующей части шнекового пресса и повышение эффективности пластического формования изделий строительной керамики: Автореф. дис. канд. техн. наук. Белгород, 1999. 22 с
8. Туренко А.В. Расчёт глиноперерабатывающего оборудования и прессов пластического формования для производства керамических строительных изделий: Учебное пособие. М.: МИСИ, 1985. 86 с.
9. Туренко А.В., Герасимов М.Д. Малогабаритный кирпичелательный агрегат для формования безобжиговых керамических строительных материалов. Тезисы докл. Междунар. конф. «Ресурсо- и энергосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций», Часть.4, БелГТАСМ, Белгород, 1995, С.12.
10. Воларович М.П. Ротационные вискозиметры для исследования реологических свойств дисперсных систем (обзор) // Коллоидный журнал. 1966. Т. 28. №2. С. 198–211.
11. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов. М.: Пищевая промышленность. 1976. 384 с.
12. Пивинский Ю.Е. Керамические вяжущие и керамобетоны. М.: Металлургия, 1990. 272 с
13. Рыбьева Т.Т. Ещё о коническом пластометре для определения реологических свойств строительных материалов // Строительные материалы. 1981. №10. С.19–20.
14. Рейнер М. Реология. Пер. с англ. М.: «Наука», 1969. 223 с.
15. Силенок С.Г., Борщевский А.А., Горбовец М.Н. Механическое оборудование предприятий строительных материалов, изделий и конструкций. Учебник для ВУЗов. М.: Машиностроение, 1990. 416 с.
16. Туренко А.В., Герасимов М.Д., Королёв В.А., Усманов А.К. Способ определения реологических свойств пластических глиномасс в заводских условиях. В науч. Реф. Сб. Промышленность строительных материалов. Серия 4. М.: ВНИИЭСМ, 1979, С. 25–28.

---

#### Gerasimov M.D., Gorshkov P.S., Brazhnik Y.V., Grudina V.A. DEVELOPMENT OF PROPOSALS FOR USING VARIATION VARIANTS (SOPEL) FOR BUILDING 3D PRINTER

*The intensive development of additive technologies in a number of industries has necessitated the implementation of similar projects in construction. In the construction equipment market, installations for the production of construction works and the manufacture of a number of construction products are widely advertised. It should be noted that at present a whole range of works is being carried out in many research centers for working out the optimal compositions of the building mix, mixing and molding equipment, automation and control means for obtaining building 3D models. It is known that in related industries such as medicine, the production of computer equipment, some experience has been accumulated that can be used in additive technologies of construction industry. Analysis and critical evaluation of existing tools in related industries can significantly reduce the amount and time of research on the introduction of additive technologies in construction.*

**Key words:** *additive technologies, construction production, screw supercharger, molding head, nozzle, rheological model, effective viscosity.*

---